

**Erstellung einer Datenbasis zum  
Auslaugverhalten von Frischbeton  
unterschiedlicher Zusammensetzung**

**T 3310**

T 3310

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9326-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)



Lin/Fk

0. Ausfertigung

## THEMA

Erstellung einer Datenbasis zum  
Auslaugverhalten von Frischbeton  
unterschiedlicher Zusammensetzung

- ABSCHLUSSBERICHT -

**Forschungsbericht Nr.**

F 7058  
vom 15.04.2013

**Projektbearbeitung**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

M. Sc. X. Lin

Dr.-Ing. A. Vollpracht

**Auftraggeber/Förderer**

Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstr. 30L  
10829 Berlin

**Vertragsdatum/Auftragsbestätigung** 05.01.2010

**Ihr Aktenzeichen** ZP 52-5- 20.52-1346/10

Dieser Bericht umfasst    Seiten, davon    Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

## Inhaltsverzeichnis

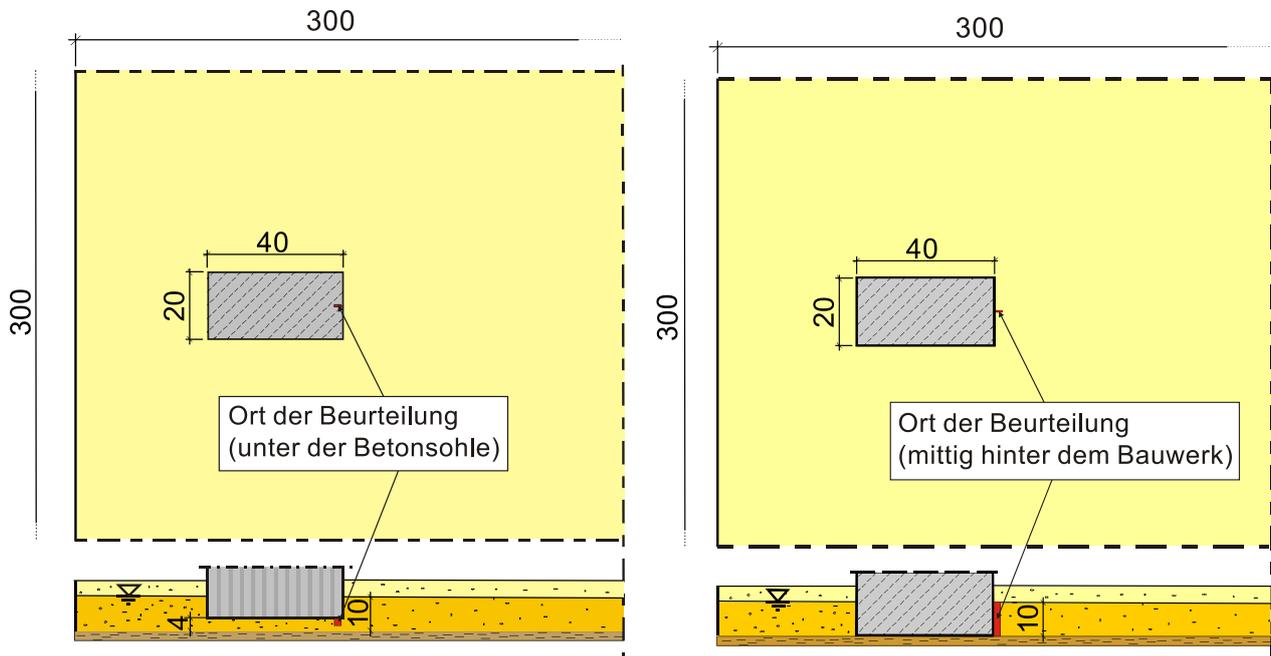
1	EINLEITUNG .....	1
2	DARSTELLUNG DES UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS.....	3
2.1	Übersicht.....	3
2.2	Charakterisierung der Ausgangsstoffe.....	5
2.3	Versuchsbeschreibung des Frischbetonstandtests mit anschließendem Langzeitstandtest.....	6
2.4	Versuchsbeschreibung des dynamischen Versuchs.....	8
2.5	Versuchsbeschreibung des Langzeitstandtests .....	11
3	AUSWERTUNG DER AUSLAUGVERSUCHE.....	11
3.1	Auswertung der Standtests .....	11
3.1.1	Bestimmung der Freisetzung .....	11
3.1.2	Bestimmung der Auslaugraten .....	12
3.2	Auswertung des dynamischen Versuchs .....	14
4	DARSTELLUNG UND AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	15
4.1	Ausgangsstoffe .....	15
4.2	Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest.....	19
4.2.1	Ergebniszusammenstellung .....	19
4.2.2	pH-Wert, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit.....	24
4.2.3	Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat .....	28
4.2.4	Spurenelemente und Barium .....	39
4.3	Langzeitstandtest nach DAfStb-Richtlinie .....	60
4.3.1	Allgemeines .....	60
4.3.2	Ergebniszusammenstellung .....	61
4.3.3	pH-Wert, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit.....	63
4.3.4	Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat .....	65
4.3.5	Spurenelemente und Barium .....	69
4.4	Gegenüberstellung der Standtests.....	76
4.5	Dynamischer Versuch .....	83

4.5.1	Ergebniszusammenstellung .....	83
4.5.2	pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Redoxpotential.....	83
4.5.3	Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat .....	85
4.5.4	Spurenelemente und Barium .....	90
4.6	Gegenüberstellung von dynamischem Versuch und Frischbetonstandtest	96
5	ZUSAMMENFASSUNG .....	103
6	LITERATUR .....	107
	<b>Tabellen .....</b>	<b>A1-A26</b>
	<b>Bilder.....</b>	<b>B1-B8</b>

## 1 EINLEITUNG

Im Rahmen von Zulassungsprüfungen wird neben der bautechnischen Eignung auch die Umweltverträglichkeit des Bauprodukts geprüft. Bei Beton wird die Auslaugung anorganischer umweltrelevanter Parameter untersucht, die den Boden und das Grundwasser negativ beeinflussen könnten. Im DIBt wurde hierzu das Grundsatzpapier „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ /DIB09, DIB11/ erarbeitet. Im Teil I ist das generelle Nachweiskonzept dargestellt. Im Teil II werden die Auslaugversuche und die Bewertung für die einzelnen Baustoffe festgelegt. Das Kapitel „Betonausgangsstoffe und Beton“ behandelt bisher nur die Festbetonphase /DIB11/. Es ist jedoch vorgesehen, für bestimmte Anwendungsfälle, wie z. B. den Einsatz von Unterwasserbeton, auch die Frischbetonphase zu betrachten. Der entsprechende Abschnitt zur Elution des Frischbetons soll noch ergänzt werden.

Die Auslaugung von umweltrelevanten anorganischen Parametern aus Frischbeton wird von vielen Faktoren beeinflusst. Anders als beim erhärteten Beton liegt zu Beginn der Hydratation keine definierte Phasengrenze zwischen Zementleim und angrenzendem Wasser vor. Die Lösungskinetik der Schadstoffe und die Austauschrate des anstehenden Wassers spielen für die Auslaugung eine wesentliche Rolle. Im Rahmen eines vom DAfStb geförderten Forschungsprojekts wurde am Institut für Bauforschung ein Vorschlag zur Bewertung der Auslaugung während der Frischbetonphase erarbeitet (s. /Bra07a/). Das Projekt baut auf den früheren vom DIBt geförderten Projekten /Bra03, Bra05/ auf. Ein wesentlicher Faktor bei der Bewertung ist die Übertragung der im Versuch ermittelten Auslaugraten auf den praktischen Anwendungsfall, d. h. die Auslaugung bei Kontakt mit wassergesättigtem Boden bzw. Grundwasser. Diese Frage konnte in den Projekten /Bra03, Bra05/ nicht beantwortet werden. In /Bra07a/ wurden für zwei Parameter (Chrom und Molybdän) Umrechnungsfaktoren zwischen dem Frischbetonstandtest und dem vergleichsweise praxisgerechten dynamischen Versuch abgeleitet, die allerdings nur für die spezifischen Randbedingungen des Versuchs und den verwendeten Portlandzementbeton gelten. Eine numerische Transportsimulation wurde auf Basis der Versuchsergebnisse des Frischbetonstandtests und der Umrechnungsfaktoren in /Bra07a/ durchgeführt. Zur Anpassung an die Versuchsbedingungen wurde anstelle des Modellgebiets aus dem Bewertungskonzept für Festbeton /DIB11/ eine Unterwasserbetonsole in einer mit Spundwänden umschlossenen Baugrube vorgesehen (s. Bild 1). Zudem wurde eine Grundwasserfließgeschwindigkeit von 0,4 m/d am Ort der Beurteilung angenommen, um die Bedingungen im Laborversuch abzubilden. Allerdings ist diese Fließgeschwindigkeit wesentlich höher als die in /DIB11/ (s. Tabelle 1).



**Bild 1:** Modellgebiet bei der Modellierung in /Bra07a/ (links) und in /DIB11/ (rechts)

**Tabelle 1:** Randbedingungen bei der Modellierung von Stoffkonzentrationen im Kontaktgrundwasser nach /Bra07a/ und /DIB11/

Parameter	Symbol	/Bra07a/	/DIB11/
1	2	3	4
Durchlässigkeitsbeiwert	$k_f$	$1,3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$	$10^{-4} \text{ m/s}$
effektive Porosität	$n_e$	0,39	0,1
Grundwassergefälle	$i$	$3 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$
Fließgeschwindigkeit am Ort der Beurteilung	$v_f$	0,4 m/d	$7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/d}$
Anisotropiefaktor	-	1 (Isotropie)	1 (Isotropie)
Retardierung, chemischer- oder biologischer Abbau	-	ohne	ohne
Auszulaugende Fläche	-	Sohle	Wände
Ort der Beurteilung	-	unter der Betonsohle	Mittig hinter dem Bauwerk
Räumliche Mittelung	-	2 m x 2 m	2 m
Bewertungszeitraum (zeitliche Mittelung)	-	6 Monate	6 Monate

Analog zum Vorgehen bei der Bewertung von Festbeton /DIB11/ wurden die berechneten mittleren Kontaktgrundwasserkonzentrationen über der Freisetzung im Frischbetonstandtest aufgetragen. Zwischen der mittleren Kontaktgrundwasserkonzentrationen und der Freisetzung im Frischbetonstandtest wurde ein linearer Zusammenhang gefunden.

Das in /Bra07a/ beschriebene Konzept ist nicht auf andere Einbauszenarien anwendbar, da sich z. B. bei langsamerer Fließgeschwindigkeit oder bindigem Boden andere pH-Werte in der Kontaktzone zum Beton einstellen.

In den bisherigen Forschungsprojekten wurden nur wenige Betonausgangsstoffe (zwei Zemente und eine Flugasche) betrachtet. Es existiert daher keine umfassende Datenbasis für genormte Betonausgangsstoffe.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, einerseits das in /Bra07a/ erarbeitete Konzept zu überprüfen und ggf. auf weitere Spurenelemente zu erweitern und andererseits eine Datenbasis für genormte Betonausgangsstoffe zu erstellen. Anhand dieser Datenbasis kann später abgeschätzt werden, ob eine Bewertung der Frischbetonphase bei der Beurteilung der Umweltverträglichkeit gemäß /DIB11/ entfallen kann. Falls eine Untersuchung der Frischbetonauslaugung im Rahmen von Zulassungsversuchen erforderlich sein sollte, kann die Datenbasis dazu dienen, die im Rahmen von Zulassungsversuchen bestimmten Freisetzungen von neuen Bauprodukten einzuordnen. Bisher wurden Portlandzemente und rudimentär Flugasche hinsichtlich der Auslaugung im Frischbetonstadium untersucht. Bei diesen Versuchen wurden häufig nicht alle umweltrelevanten anorganischen Parameter berücksichtigt. In dieses Projekt wurden daher die Ausgangsstoffe Portlandzement, Portlandkalksteinzement, Hochofenzement sowie zwei Flugaschen und ein Silikastaub aufgenommen und alle anorganischen Parameter nach /LAW04/ betrachtet.

## **2 DARSTELLUNG DES UNTERSUCHUNGSPROGRAMMS**

### **2.1 Übersicht**

Als Standardversuch zur Bestimmung des Auslaugverhaltens wurde in /Bra07a/ der Frischbetonstandtest herangezogen (s. Abschnitt 2.3). Zur Erstellung einer Datenbasis wurde dieser Versuch an sechs Betonmischungen mit unterschiedlichen Bindemitteln durchgeführt (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht der Mischungen

Nr.	Zement		Betonzusatzstoff		$w/z_{eq} = w/(z + 0,7 f)^{1)}$
	Art	Gehalt	Art	Gehalt	
-	-	kg/m <sup>3</sup>	-	kg/m <sup>3</sup>	-
1	2	3	4	5	6
M 10	CEM I 42,5 R (Z1)	300	-	-	0,55
M 20	CEM II/A-LL 32,5 R (Z2)	300	-	-	0,55
M 30	CEM III/A 32,5 N (Z3)	300	-	-	0,55
M 11	CEM I 42,5 R (Z1)	270	F lugasche (FA1)	90	0,52
M 12	CEM I 42,5 R (Z1)	270	Flugasche (FA2)	90	0,52
M 13	CEM I 42,5 R (Z1)	270	Silikastaub	27	0,55

1) Bei Einbau von Beton im Grundwasser (Unterwasserbeton oder Bohrpfahlbeton) wird die Flugasche mit  $k = 0,7$  auf den  $w/z$ -Wert angerechnet. Aufgrund einer fehlerhaften Mischungsberechnung ergab sich bei M 11 und M 12 ein  $w/z_{eq}$  von 0,52

Die Betonzusammensetzungen orientierten sich an den für Anwendungen im Grundwasser üblichen Rezepturen. Als Gesteinskörnung wurde Rhein-Kies-Sand mit der Sieblinie A/B16 eingesetzt. Auf Betonzusatzmittel und Schalöl wurde verzichtet.

Die im Frischbetonstandtest ermittelten Freisetzungsmengen müssen bei der Übertragung auf die Verhältnisse im Grundwasser umgerechnet werden. Zur Überprüfung der in /Bra07a/ ermittelten Umrechnungsfaktoren für Chrom und Molybdän und für die Ableitung weiterer Faktoren, z. B. für Vanadium, wurden in diesem Projekt Untersuchungen mit dem dynamischen Versuch (s. Abschnitt 2.4) durchgeführt. Es wurden drei Mischungen ausgewählt: M 10, M 30 und M 11. Mit dieser Auswahl werden die in Deutschland am häufigsten eingesetzten Bindemittelkomponenten (Portlandzementklinker, Hüttensand und Flugasche) abgedeckt. Um abschätzen zu können, ob eine separate Bewertung der Frischbetonphase erforderlich ist, wurden die drei ausgewählten Mischungen zusätzlich im Langzeitstandtest nach /DAf05/ geprüft. In Tabelle 3 sind die durchgeführten Versuche sowie der Parameterumfang zusammengefasst.

**Tabelle 3:** Übersicht der Auslaugversuche

lfd. Nr.	Versuch	Zielsetzung	Umfang	untersuchte Parameter
1	2	3	4	5
1	Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest	Vergleich des Auslaugverhaltens unterschiedlicher Mischungen	alle sechs Mischungen, Doppelbestimmung	pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential, Konzentrationen an Na, K, Sb, As, Ba, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mo, Ni, Hg, Se, Ti, V, Zn sowie Chlorid, Cyanid, Fluorid und Sulfat
2	dynamischer Versuch	Ermittlung der zeitabhängigen Freisetzung von Frischbeton bei realistischen Randbedingungen	drei ausgewählte Mischungen, Doppelbestimmung	
3	Langzeitstandtest	Abschätzung, ob eine separate Bewertung der Frischbetonphase erforderlich ist		

Die Analyse der Spurenelemente und Barium in den Eluaten erfolgte mit dem optischen Emissionsspektrometer mit induktiv gekoppelten Hochfrequenzplasma (ICP-OES) (DIN EN ISO 11885:2009-09). Der Bor-Gehalt konnte mit dieser Methode nicht zuverlässig gemessen werden. Daher wurde Bor nicht berücksichtigt. Natrium und Kalium wurden im Flammenphotometer analog zu DIN EN 196-2:2005-05 analysiert. Für Chlorid und Sulfat wurde die Ionenchromatographie eingesetzt. Es muss beachtet werden, dass alle Versuchseinrichtungen in diesem Projekt nicht vollkommen luftdicht waren. Dies führte zu einer Absenkung der pH-Werte durch CO<sub>2</sub>-Zutritt und möglicherweise zu einer Erhöhung der Freisetzung von Schwermetallen (wie z. B. Vanadium).

## 2.2 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Zur Erweiterung der bestehenden Datengrundlage zur Frischbetonauslaugung wurden ein Portlandzement, ein Portlandkalksteinzement und ein Hochofenzement ausgewählt. Da in der Praxis inzwischen ausschließlich chromatreduzierte Zemente zum Einsatz kommen, wurden auch für dieses Projekt chromatreduzierte Zemente verwendet. Alle Zemente stammen aus demselben Werk. Der Portlandzement wurde zusätzlich mit Flugaschen bzw. Silikastaub kombiniert (s. Tabelle 2).

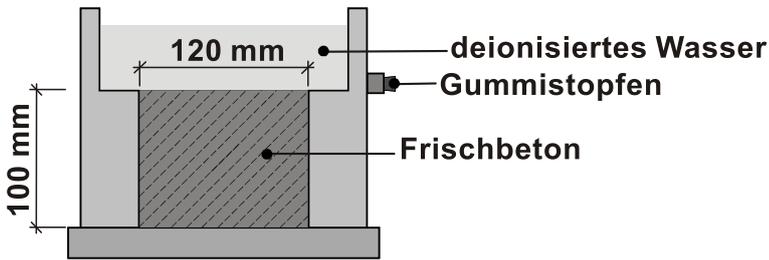
Die Zemente sowie die zwei Flugaschen und der Silikastaub wurden gemäß DIN 196-2:2005-05 chemisch analysiert (s. Tabelle A1). Sulfat- und Kohlenstoffgehalt wurden im Kohlenstoff-Schwefel-Analysator (CSA 2003) gemessen, die Alkalien und die Hauptbestandteile wurden mit der Röntgenfluoreszenzanalyse gemäß DIN 51418-1:1996-09 bestimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Natrium mit dieser Methode nicht vollständig erfasst wird, da es beim Aufschluss teilweise verdampft. Anhand der chemischen Analyse erfolgte die quantitative Bestimmung der Bestandteile der Zemente nach /DIN07/ (s. Tabelle A2). Es ist ersichtlich, dass der CEM II/A-LL mit 5,7 M.-% nur einen geringen Kalksteingehalt aufweist.

Die Gehalte der Elemente Antimon, Arsen, Barium, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Selen, Thallium, Vanadium und Zink wurden nach Königswasseraufschluss (gemäß DIN EN ISO 13346:2001-04) mit der ICP-OES (DIN EN ISO 11885: 2009-09) gemessen (s. Tabelle A3). Der Bor-Gehalt kann mit der ICP-OES nicht zuverlässig gemessen werden. Daher wurde Bor nicht analysiert.

Neben der chemischen Analyse wurde der Wasseranspruch und der Erstarrungsbeginn der Zemente und Bindemittelkombinationen nach DIN EN 196-3:2005-05 bestimmt (s. Tabelle A4).

## **2.3 Versuchsbeschreibung des Frischbetonstandtests mit anschließendem Langzeitstandtest**

Beim Frischbetonstandtest wird die Frischbetonoberfläche direkt mit Wasser beaufschlagt. Die hierzu verwendete Versuchseinrichtung ist in Bild 2 dargestellt. Der Frischbeton wird in den unteren Teil der Form eingefüllt, verdichtet und sorgfältig abgestrichen, so dass sich auf dem auskragenden Rand der Form kein Beton befindet. Der Eluent (deionisiertes Wasser) wird unmittelbar nach dem Befüllen der Form (Betonalter  $\leq 0,5$  h) mit einem Trichter vorsichtig in den oberen Teil eingefüllt, so dass die Betonoberfläche möglichst wenig gestört wird. Das Wasser wird über einen verschließbaren Auslass gewechselt, wobei jeweils eine Probe genommen wird. Die Auslaugrate der anorganischen Stoffe nimmt normalerweise mit der Zeit ab. Daher werden die Wechselzeiten so gewählt, dass die Elutionsdauer mit jedem Elutionsschritt zunimmt (s. Tabelle 4). Das Verhältnis von Volumen des Eluenten zu Oberfläche des Betons beträgt  $V/O = 80$  l/m<sup>2</sup>.



**Bild 2:** Schematische Darstellung des Frischbetonstandtests

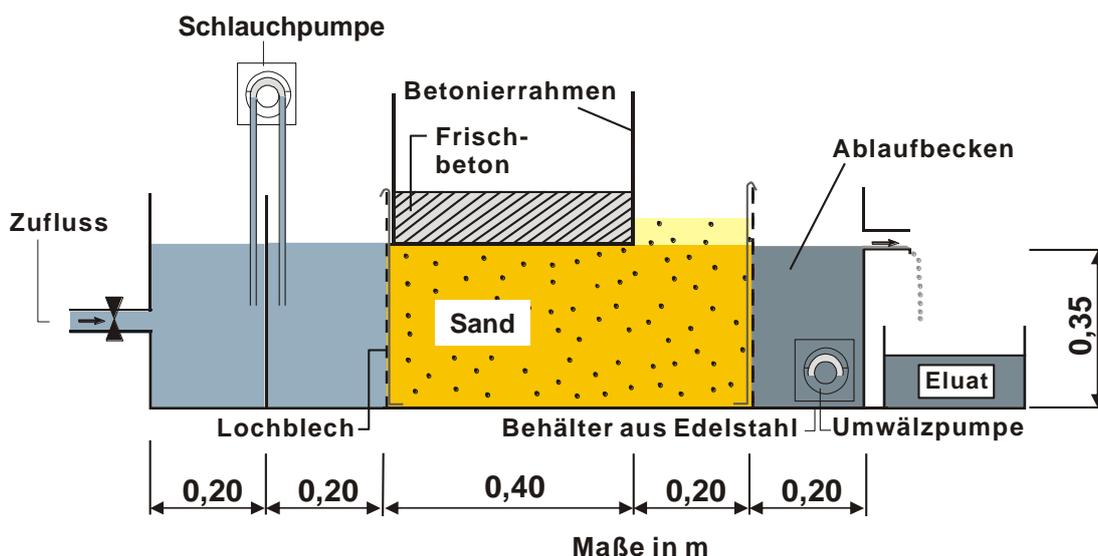
Nach der Auslaugung während der Frischbetonphase wurde die Untersuchung am erhärteten Beton fortgeführt, um den Einfluss der Frischbetonauslaugung auf die Freisetzungen während der Festbetonphase zu erfassen. Die Wechselzeiten orientierten sich am Langzeitstandtest /DAf05/. Der Beton verblieb in der Versuchseinrichtung. In Tabelle 4 sind die gewählten Entnahmezeiten angegeben. Die Prüfung wird als Doppelbestimmung durchgeführt. Neben den Eluatn wurde das verwendete deionisierte Wasser analysiert (Blindwert). Für die ersten Elutionsschritte wurde das Wasser in einen Vorratsbehälter gefüllt und nur ein Blindwert für mehrere Eluate ermittelt. Insgesamt wurde 40 Blindproben analysiert.

**Tabelle 4:** Entnahmezeiten für den Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

Eluat Nr.	Versuch	Einheit	Entnahmezeiten
1	2	3	4
1	Frischbetonstandtest	h	0,5
2			2,0
3			4,5
4			8,0
5			14,0
6			24,0
7	Langzeitstandtest	d	2
8			4
9			8
10			17
11			33
12			57

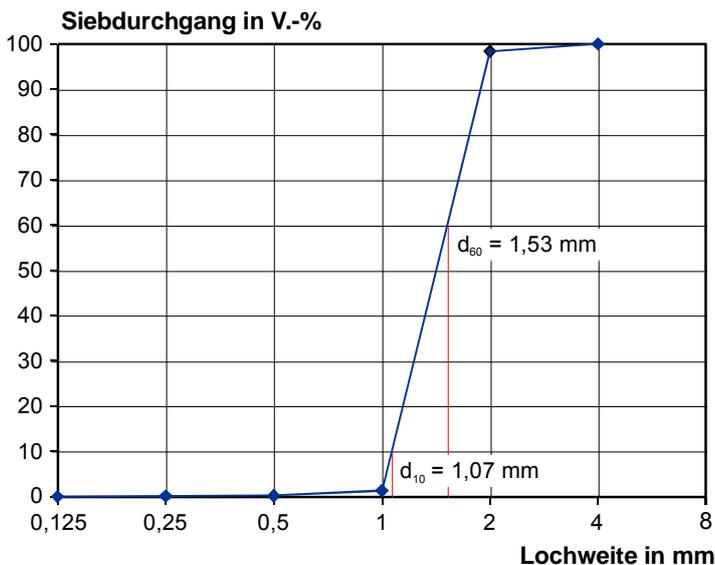
## 2.4 Versuchsbeschreibung des dynamischen Versuchs

Der dynamische Versuch wurde im Rahmen von /Bra05/ basierend auf vorhergehenden Forschungsarbeiten entwickelt und soll strömendes Grundwasser simulieren. Die Versuchseinrichtung ist in Bild 3 dargestellt. Die Breite des Versuchsaufbaus beträgt 0,4 m. Nach dem Einbau des Sandbodens wird der Sand zunächst ein lang Tag gespült, um Feinpartikel und Verunreinigungen zu entfernen. Kurz vor dem Aufbringen des Betons werden Blindproben am Überlauf genommen. Anschließend wird der Frischbeton (Alter  $\approx$  15 min) an der Zulaufseite auf das wassergesättigte Sandbett aufgebracht. Es wird eine Fläche von  $0,4 \cdot 0,4 \text{ m}^2$  betoniert. Die Schichtdicke des Betons beträgt 0,1 m. Der Beton wird mit der Kelle leicht verdichtet und nicht gerüttelt. Zur Elution wird Leitungswasser verwendet, das an der Unterseite des Frischbetons entlang durch das Sandbett strömt. Im Ablaufbecken wird das Wasser durch eine Umwälzpumpe homogenisiert. Die Proben des Eluats werden am Überlauf des Ablaufbeckens entnommen. Es wird jeweils eine Mischprobe über den Zeitraum zwischen zwei Eluatentnahmen gewonnen und analysiert. Daher entspricht das Analyseergebnis nicht der Konzentration zum Zeitpunkt der Entnahme, sondern einem Mittelwert über den Entnahmezeitraum. Diese Vorgehensweise ist zwar in Bezug auf den Konzentrationsverlauf ungenauer, dafür ermöglicht sie jedoch die Bilanzierung der freigesetzten Fracht.



**Bild 3:** Dynamischer Versuch, Fließstrecke 0,6 m, /Bra07a/

In diesem Versuch ist die Wahl eines enggestuften Bodens mit geringen Mengen an Feinanteilen sinnvoll, da sich dann eine gleichmäßigere Strömung und eine geringe Adsorption einstellt, /Bra07a/. Daher wurde ein Quarzsand der Körnung 1 – 2 mm gewählt. Die Sieblinie des Sandes ist in Bild 4 dargestellt, Tabelle 5 enthält die Kennwerte des eingebauten Sandbodens.



**Bild 4:** Sieblinie des Prüfsands für den dynamischen Versuch /Bra07a/

**Tabelle 5:** Kennwerte des Sandbodens im dynamischen Versuch, /Bra07a/

Parameter	Einheit	Wert	Kategorie
1	2	3	4
Lagerungsdichte	$\text{kg/m}^3$	1538	Mitteldichte Lagerung ( $D=0,6$ )
Ungleichförmigkeit $U=d_{60}/d_{10}$	-	1,43	Gleichförmiger Boden
Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = c(U) \cdot d_{10}^{2 \cdot 1)}$	m/s	$1,3 \cdot 10^{-2}$	stark durchlässig
Effektive Porosität $n_e^{2)}$	-	0,37	-

1) Näherungsformel nach Beyer,  $c(U) = 0,011$ , /Smo96/

2) Gesamtporosität  $V_p/V_{\text{ges}} = 0,42$ ; nach /Smo96/ ist  $n_e$  in diesem Boden um ca. 0,05 geringer

Der Wasserzufluss wird durch eine Schlauchpumpe geregelt und kann auf sehr kleine Fließgeschwindigkeiten eingestellt werden. Es wurde eine Fließgeschwindigkeit von 1,0 m/d gewählt. Die Fördermenge des Wassers kann nach Gleichung (1) aus der Fließgeschwindigkeit berechnet werden /Bra07a/:

$$q = \frac{v \cdot V_{\text{Wasser}}}{24 \cdot \frac{l}{2}} \quad (1)$$

v: Fließgeschwindigkeit in m/d

q: Fördermenge in l/h

$V_{\text{Wasser}}$ : Volumen des Wassers im Sandbett in l

$l/2$ : mittlere Fließstrecke  $l/2 = 0,3 \text{ m}$

Die Entnahmezeiten sind in Tabelle 6 angegeben. Es wurde eine längere Versuchslaufzeit als in /Bra07a/ gewählt, um die Freisetzung besser quantifizieren zu können. Auch dieser Versuch wurde der als Doppelbestimmung durchgeführt.

Tabelle 6: Entnahmezeiten für den dynamischen Versuch

Eluat Nr.	Entnahmezeiten
-	h
1	2
Blindwert	0
1	3
2	4
3	6
4	9
5	14
6	24
7	36
8	48
9	60
10	72
11	84
12	100

## 2.5 Versuchsbeschreibung des Langzeitstandtests

Neben den Auslaugversuchen an Frischbeton wurden Langzeitstandtests nach DAfStb-Richtlinie /DAf05/ an den Betonen M 10, M 11 und M 30 aus Tabelle 2 durchgeführt. Die Probekörper sind Würfel mit 100 mm Kantenlänge. Für die Herstellung wurde eine Kunststoffolie ausgeschlagene Stahlschalung genutzt. Nach einem Tag wurden die Betonwürfel ausgeschalt, in Folie verpackt und derart luftdicht versiegelt bis zum Beginn des Langzeitstandtests im Alter von 56 Tagen bei 20 °C gelagert.

Der Versuch wird mit deionisiertem Wasser durchgeführt (s. Bild 5). Nach jeweils 1, 3, 7, 16, 32 und 56 Tagen wird das Wasser vollständig entnommen und analysiert. Die Wassermenge beträgt 4,8 l ( $V/O = 80 \text{ l/m}^2$ ). Der Versuch wurde in Doppelbestimmung durchgeführt. Begleitend wurde das verwendete deionisierte Wasser beprobt (Blindwerte).

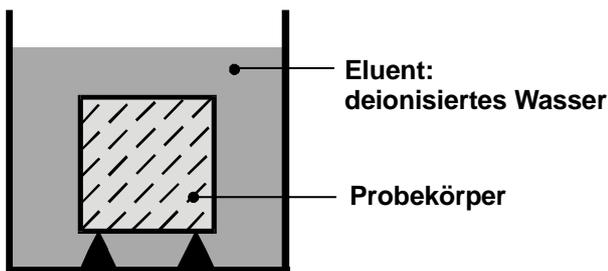


Bild 5: Schematische Darstellung des Langzeitstandtests

## 3 AUSWERTUNG DER AUSLAUGVERSUCHE

### 3.1 Auswertung der Standtests

#### 3.1.1 Bestimmung der Freisetzung

Bei den Standtests (DAfStb-Langzeitstandtest bzw. Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest) wird zunächst die Freisetzung  $E_i$  in jedem einzelnen Elutionsschritt  $i$  berechnet. Die kumulative Freisetzung ergibt sich durch Aufsummierung von  $E_i$  (siehe Gleichung (2)).

$$E_n = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \frac{V}{O} \quad (2)$$

$E_n$ : kumulative Freisetzung am Ende von Intervall n in  $\text{mg}/\text{m}^2$

$E_i$ : Freisetzung während des Auslaugintervalls i in  $\text{mg}/\text{m}^2$

$c_i$ : Konzentration im Eluat i in  $\text{mg}/\text{l}$

$V/O$ : Verhältnis des Eluenten-Volumens zur Oberfläche des Prüfkörpers,  $V/O = 80 \text{ l}/\text{m}^2$

Wenn die Eluatkonzentration ( $c_i$ ) unterhalb der Bestimmungsgrenze lag, wurde  $c_i$  bei Abschätzung der maximalen kumulativen Freisetzungen ( $E_{n,\text{max}}$ ) in Höhe der Bestimmungsgrenze gewählt. Zur Ermittlung der minimalen kumulativen Freisetzungen ( $E_{n,\text{min}}$ ) wurde  $c_i$  zu Null gewählt.

Für den DAfStb-Langzeitstandtest kann die zulässige Gesamtfreisetzung nach 56 Tagen (zul.  $E_{56}$ ) aus der Geringfügigkeitsschwelle (GFS) berechnet werden, /DIB11/:

$$\text{zul. } E_{56\text{d}} = \text{GFS} / 0,97 \quad (2)$$

(zul.  $E_{56}$  in  $\text{mg}/\text{m}^2$  und GFS in  $\mu\text{g}/\text{l}$ )

### 3.1.2 Bestimmung der Auslaugraten

Neben der Freisetzung ( $E$ ) wurden die Auslaugraten ( $J$ ) berechnet. Die Auslaugrate entspricht der Geschwindigkeit der Freisetzung.

$$J_i = \frac{E_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (3)$$

$J_i$ : mittlere Auslaugrate im Elutionsschritt i, in  $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$

$t_i$ : Zeit am Ende des Elutionsschritts i in d

$t_{i-1}$ : Zeit am Ende des Elutionsschritts (i-1) bzw. am Anfang des Elutionsschritts i in d

$J_i$  ist nach Gleichung (3) die mittlere Freisetzungsrates eines Elutionsschritts. Für die Darstellung des Auslaugverhaltens im Verlauf der Zeit in  $J - t$ - bzw.  $\lg J - \lg t$ -Diagramm ist es notwendig,  $J_i$  einen entsprechenden Zeitpunkt  $t_{M,i}$  zuzuordnen. Bei diffusionskontrollierten Auslaugprozessen aus einem porösen Festkörper ohne Grenzschicht tritt ein lineares Verhalten zwischen  $\lg J$  und  $\lg t$  auf [Bra12]. Daher wurde die Auslaugrate  $J$  beschrieben als:

$$\lg J = f \cdot \lg t + \lg m \text{ bzw. } J(t) = m \cdot t^f \quad (4)$$

$f, m$ : Konstanten

Daher gilt:

$$J_i = J(t_{M,i}) = \frac{E_i}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} J \cdot dt}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} m \cdot t^f \cdot dt}{t_i - t_{i-1}} = \frac{m}{f+1} \cdot \frac{t_i^{f+1} - t_{i-1}^{f+1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (5)$$

Aus den Gleichungen (4) und (5) folgt:

$$t_{M,i} = \left( \frac{t_i^{f+1} - t_{i-1}^{f+1}}{(f+1) \cdot (t_i - t_{i-1})} \right)^{\frac{1}{f}} \quad (6)$$

$t_{M,i}$  muss iterativ anhand der ermittelten Steigung bestimmt werden.

Beim Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest wurde die Auslaugrate nur für die Festbetonphase berechnet. Bei einigen Parametern ergab sich hier in der doppeltlogarithmischen Darstellung keine Gerade, d. h. Gleichung (4) ist nicht gültig. Daher kann Gleichung (6) nicht angewendet werden. Bei diesen Parametern (insbesondere Sulfat und Vanadium) wurde  $J_i$  in erster Näherung über der Mitte des Zeitintervalls aufgetragen.

### 3.2 Auswertung des dynamischen Versuchs

Wie in Abschnitt 2.3 dargelegt wird der dynamische Versuch mit Leitungswasser durchgeführt. Daher sind die Hintergrundkonzentrationen zu beachten. Es wurde bei jedem Einzelversuch eine Blindprobe am Überlauf gewonnen. Lag der Blindwert unter der Bestimmungsgrenze, so wurde er bei der Auswertung zu Null angenommen. Die Freisetzung wurde nach Gleichung (7) berechnet.

$$E_n = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (c_i - c_0) \cdot \frac{V}{O} \quad (7)$$

- $E_n$ : kumulative Freisetzung am Ende von Intervall n in mg/m<sup>2</sup>  
 $E_i$ : Freisetzung während des Auslaugintervalls i in mg/m<sup>2</sup>  
 $c_i$ : Konzentration im Eluat i in mg/l  
 $c_0$ : Hintergrundkonzentration für Eluent i in mg/l.  
 $V$ : Volumen des am Überlauf gesammelten Wassers in l (abhängig von der Länge des jeweiligen Elutionsschritts)  
 $O$ : Oberfläche des Betons,  $O = 0,16 \text{ m}^2$

Es kam bei einigen Eluaten vor, dass die Hintergrundkonzentration oberhalb der Eluatkonzentration lag. Dies trat insbesondere zum Ende des Versuchs auf. Gründe hierfür können Schwankungen der Hintergrundwerte oder Adsorptionseffekte sein. Zur Unterscheidung dieser beiden Aspekte wurde geprüft, ob die „negativen Freisetzungen“ systematisch (Adsorption) oder unsystematisch (Streuungen) auftraten. Für Barium kann von einer Adsorption ausgegangen werden. Bei allen anderen Stoffen wurde eine Unterschreitung der Blindwerte nicht berücksichtigt, d. h. der Term  $(c_i - c_0)$  wurde bei diesen Eluaten auf Null gesetzt.

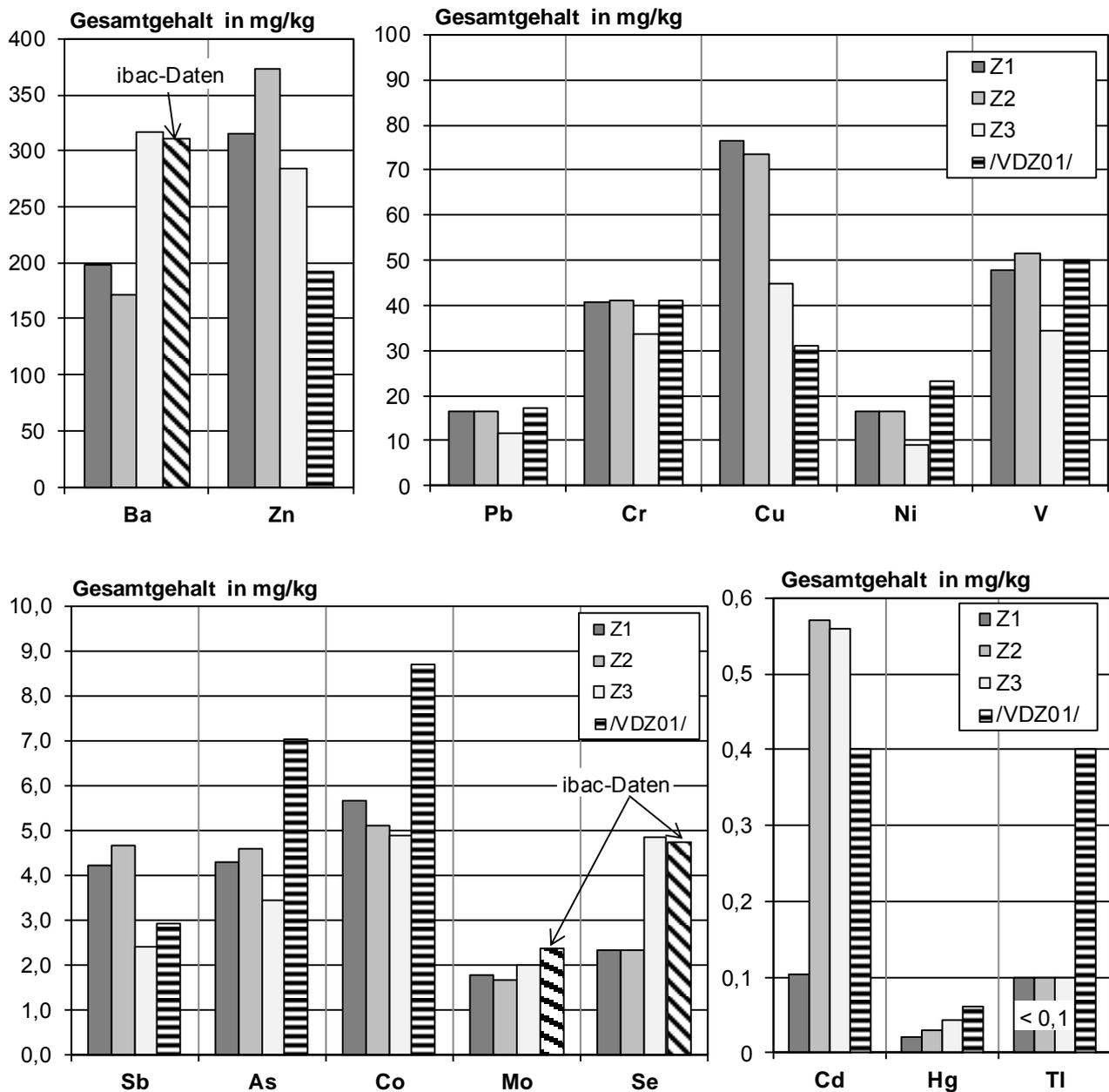
## **4 DARSTELLUNG UND AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE**

### **4.1 Ausgangsstoffe**

Die Gehalte der Spurenelemente der Ausgangsstoffe sind in Tabelle A3 dargestellt. Die Flugaschen (FA1 und FA2) weisen in der Regel deutlich höhere Gehalte auf als die Zemente und der Silikastaub. Ausnahmen sind die Parameter Zink, Chlorid und Sulfat. Die Gehalte der drei Zemente Z1, Z2, Z3 liegen meist in derselben Größenordnung. Größere Unterschiede treten bei Cadmium und Chlorid auf. Hier sind die Gehalte bei dem Zement Z1 niedriger als bei den Zementen Z2 und Z3. Der Silikastaub enthält die niedrigsten Gehalte an Barium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Nickel, Vanadium, Sulfat und die höchsten Thallium- und Chloridgehalte.

Der Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) hat im Jahr 2001 eine umfangreiche Untersuchung zu Gehalten der Spurenelemente in deutschen Normzementen veröffentlicht /VDZ01/. Die Ergebnisse von über 400 Stichproben aus der Güteüberwachung wurden gesammelt und ausgewertet. Das Bild 6 zeigt die Mittelwerte vom VDZ im Vergleich zu den untersuchten Zementen. Barium, Molybdän und Selen wurden in /VDZ01/ nicht berücksichtigt. Für diese Parameter sind zum Vergleich Mittelwerte einer ibac-internen Zementdatenbank gegeben. Für Barium und Molybdän liegen hier Gehalte von über 40 Zementen zu Grunde, für Selen nur von 8. Es ist ersichtlich, dass die Gesamtgehalte an Spurenelementen in den gewählten Zementen und die dargestellten Mittelwerte in derselben Größenordnung liegen, wobei bei den gewählten Zementen die Gehalte von Arsen, Kobalt, Nickel und Thallium niedriger, und die Gehalte von Kupfer, Zink und teilweise Cadmium höher sind als die Mittelwerte aus /VDZ01/.

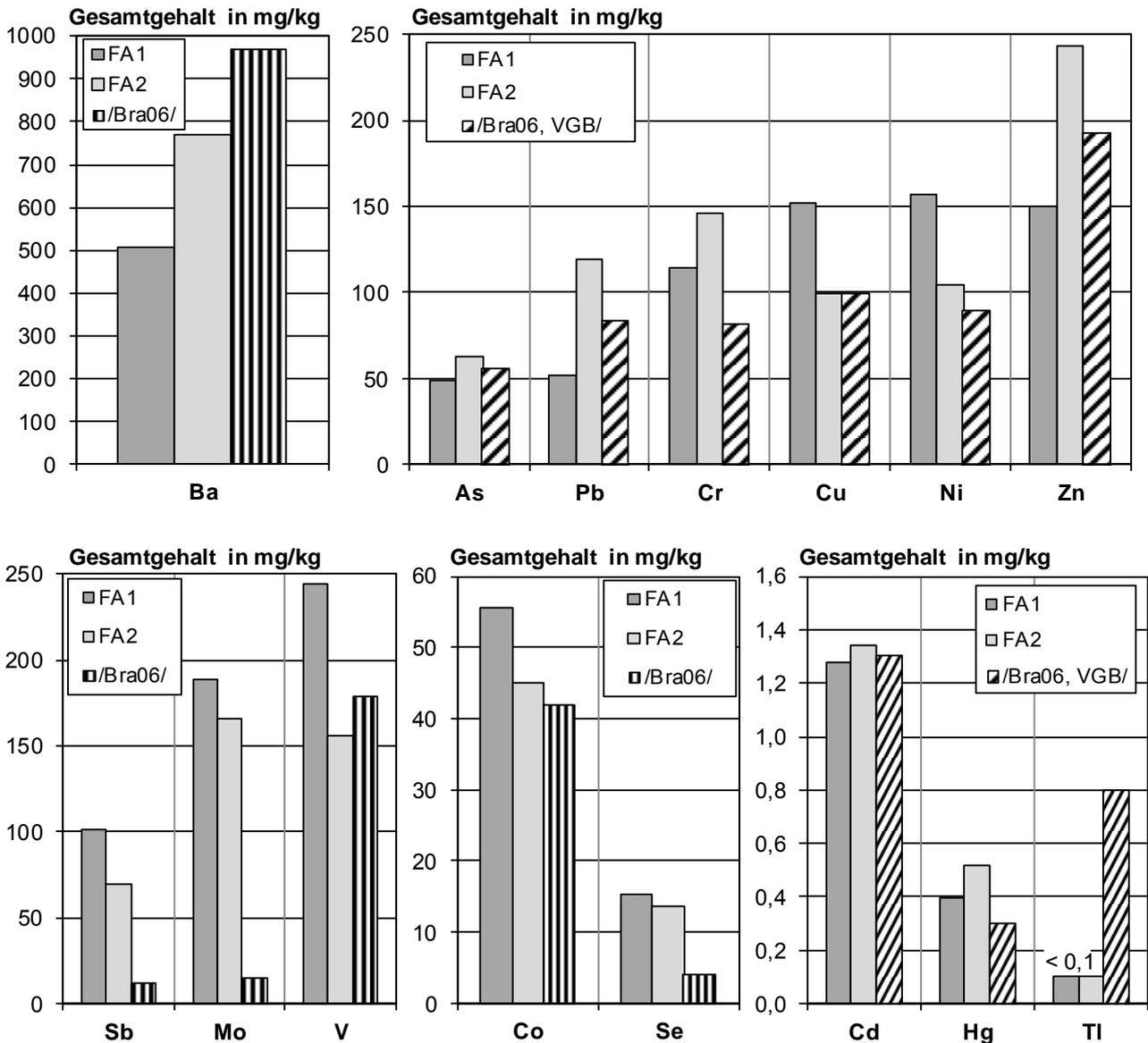
Die Gehalte an Spurenelementen in den Zementen Z1 und Z2 sind weitgehend gleich, eine Ausnahme stellt Cadmium dar, das in Zement Z1 in sehr geringen Mengen enthalten ist. Der Hochofenzement weist häufig niedrigere Schwermetallgehalte auf, erhöht sind lediglich der Barium- und Selengehalt.



**Bild 6:** Gesamtgehalte an Spurenelementen in den Zementen

Umfangreiche Daten zu Gehalten an Spurenelementen in Flugaschen, die hier zum Vergleich herangezogen werden können, wurden in /Bra06/ zusammengestellt. Die meisten Mittelwerte stammen aus einer Datensammlung der VGB PowerTech e.V., die über 400 Flugaschen umfasst. Die Parameter Antimon, Barium, Kobalt, Molybdän und Vanadium wurden in der Datensammlung nicht erfasst. Bei diesen Parametern wird auf die gesammelten Daten des ibac aus /Bra06/ zurückgegriffen, die auf 21 bis 35 Flugaschen beruhen.

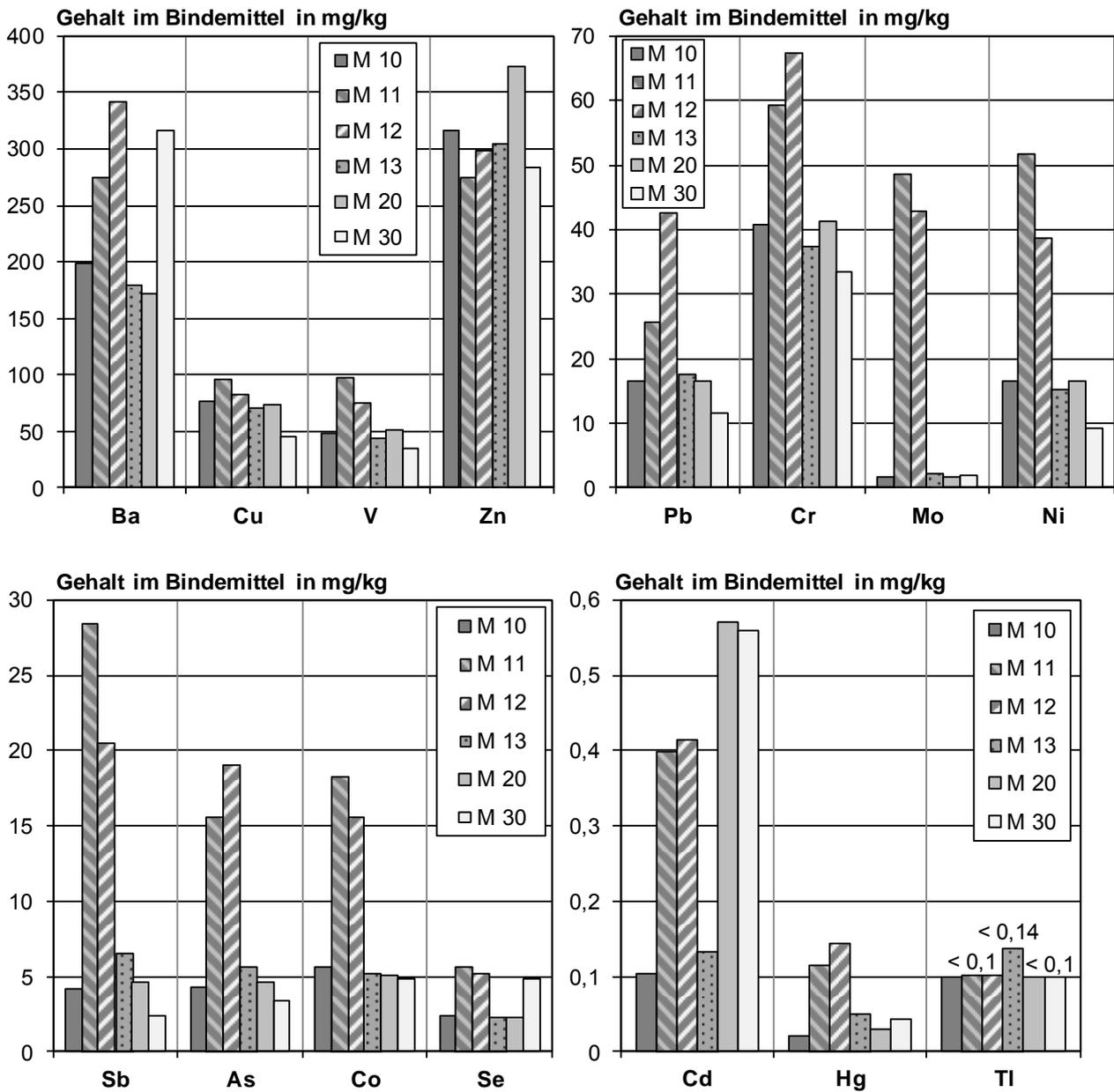
Die Mittelwerte der Gesamtgehalte an Spurenelementen in /Bra06/ wird im Vergleich zu den gewählten Flugaschen im Bild 7 gezeigt. In den gewählten Flugaschen sind die Gehalte von Antimon, Chrom, Molybdän, und Selen höher und der Gehalt von Barium und Thallium niedriger als die Mittelwerte der Datensammlungen.



**Bild 7:** Gesamtgehalte an Spurenelementen in Flugaschen

Für Silikastaub liegen zu wenig Daten und Erfahrungen vor. Eine Einstufung des ausgewählten Silikastaubs ist daher nicht möglich.

Anhand der bestimmten Gesamtgehalte der Zemente und Betonzusatzstoffe wurden die Spurenelementgehalte der eingesetzten Bindemittelkombinationen berechnet. Bild 8 zeigt den Vergleich.



**Bild 8:** Gesamtgehalte an Spurenelementen in den Bindemittelkombinationen (vgl. Tabelle 2)

Es ist ersichtlich, dass die Verwendung der Flugaschen (Mischungen M 11 und M 12) zu einer deutlichen Erhöhung der Gehalte an Antimon, Arsen, Kobalt, Molybdän, Nickel und Quecksilber im Bindemittel führt. Moderate Zunahmen sind bei Blei, Chrom, Selen und Vanadium zu beobachten. Ob die höheren Gehalte zu einer erhöhten Auslaugung aus Frischbeton führen hängt von dem Anteil leichtlöslicher Schwermetallverbindungen in der Flugasche ab.

Neben der chemischen Charakterisierung wurde das Erstarrungsverhalten geprüft, dabei wurde für die Bindemittelkombination M 13 mit Silikastaub keine signifikante Veränderung festgestellt. Durch die Zugabe der Flugaschen verzögert sich das Erstarren, wobei die Verzögerungswirkung von FA1 stärker ist als von FA2 (s. Tabelle A4). Eine Verlängerung der Frischbetonphase könnte die Auslaugung negativ beeinflussen.

## **4.2 Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest**

### **4.2.1 Ergebniszusammenstellung**

#### **4.2.1.1 Blindwerte**

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben wurden insgesamt 40 Blindproben analysiert. Tabelle 7 fasst die Ergebnisse zusammen. Angegeben ist in Spalte 3 die Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenze. Hierzu ist anzumerken, dass vom Analyselabor (Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA), Umweltanalytisches Labor) eine Bestimmungsgrenze von 1 µg/l für alle Spurenelemente mit Ausnahme von Quecksilber angegeben wurde. Für einige Spurenelemente wurde auf Nachfrage zusätzlich eine Nachweisgrenze von 0,5 µg/l angegeben (vgl. Tabelle 7) und Werte zwischen Bestimmungsgrenze und Nachweisgrenze quantifiziert. Diese Quantifizierung ist allerdings mit Unsicherheiten behaftet.

Tabelle 7 zeigt, dass die meisten untersuchten stofflichen Parameter in den Blindeluatungen nicht enthalten sind. Allerdings waren Sulfat, Barium und Zink häufiger in den Eluatungen nachweisbar. Bei Sulfat und Barium sind die Blindwerte sehr niedrig im Vergleich zu den Eluatkonzentrationen, so dass keine signifikante Verfälschung der Auslaugergebnisse zu erwarten ist. Zink wird jedoch in den Eluatungen in ähnlicher Größenordnung gefunden wie in den kontaminierten Blindproben. Dies ist bei der Interpretation der Analyseergebnisse zu berücksichtigen. Da die Quellen der Kontaminationen nicht sicher identifiziert werden konnten, ist nicht sichergestellt, dass die den Blindproben zugehörigen Eluate ebenfalls kontaminiert sind. Möglicherweise sind die Kontaminationen während der Analyse aufgetreten. Auf eine Blindwertkorrektur der Eluate wurde daher verzichtet.

**Tabelle 7:** Auswertung der Analysen der Blindproben

Parameter	Einheit	DTL	Minimum	Maximum	Mittelwert der Konzentrationen > DTL
1	2	3	4	5	6
pH-Wert	–	–	5,69	7,01	6,32
Redox-potential	mV	–	252	465	411
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	–	1,25	44,1	9,75
Natrium <sup>1)</sup>	mg/l	0,1	< 0,1	0,1	< 0,1
Kalium		0,1	alle Werte < DTL		
Chlorid <sup>2)</sup>		0,1	< 0,1	0,19	0,19
Sulfat <sup>3)</sup>		0,1	< 0,1	2,03	0,80
Cyanid		0,002	alle Werte < DTL		
Fluorid		0,1	alle Werte < DTL		
Antimon		1	alle Werte < DTL		
Arsen	1	alle Werte < DTL			
Barium <sup>4)</sup>	µg/l	1	< 1	2,23	1,96
Blei		0,5	alle Werte < DTL		
Cadmium		0,5	alle Werte < DTL		
Chrom		0,5	alle Werte < DTL		
Kobalt		0,5	alle Werte < DTL		
Kupfer <sup>5)</sup>		0,5	< 0,5	0,88	n. b.
Molybdän		1	alle Werte < DTL		
Nickel		0,5	alle Werte < DTL		
Quecksilber		0,1	alle Werte < DTL		
Selen		1	alle Werte < DTL		
Thallium		1	alle Werte < DTL		
Vanadium		0,5	alle Werte < DTL		
Zink <sup>6)</sup>		0,5	< 0,5	2,18	1,05

DTL: Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenze

n. b.: nicht berechnet

1) Natrium: in 3 von 40 Eluaten wurde die Nachweisgrenze erreicht

2) Chlorid: in 3 von 40 Eluaten wurde die Nachweisgrenze überschritten

3) Sulfat: in 15 von 40 Eluaten wurde die Nachweisgrenze überschritten

4) Barium: in 16 von 40 Eluaten wurde die Bestimmungsgrenze überschritten

5) Kupfer: in einem von 40 Eluaten wurde die Nachweisgrenze überschritten

6) Zink: in 11 von 40 Eluaten wurde die Nachweisgrenze überschritten

#### 4.2.1.2 Eluatwerte

Die Konzentrationen der Eluate sind im Anhang in den Tabellen A5 bis A16 zusammengestellt. Bei den Analysen wurden einige wenige ausreißerverdächtige Werte festgestellt, die in den Tabellen im Anhang entsprechend gekennzeichnet sind. Diese Werte wurden bei der in den folgenden Abschnitten dargestellten Auswertung aussortiert. Im ersten Schritt wurden die vier Betone M 10, M 20, M 11 und M 12, untersucht. Die Konzentrationen von Cyanid, Fluorid, Arsen, Cadmium, Kobalt, Quecksilber und Thallium lagen bei allen Eluaten unterhalb der Bestimmungsgrenze der ICP-OES. Daher wurden diese Stoffe bei M 30 und M 13 nicht analysiert.

Die Analyseergebnisse der Spurenelemente und Barium wurden dahingehend geprüft, ob eine Auswertung des Freisetzungsverlaufs sinnvoll ist. Zu diesem Zweck wurden in den Tabellen 8 und 9 die Ergebnisse für alle Mischungen und Parameter zusammengefasst und bewertet. Die Einstufung erfolgte separat für den Frischbetonstandtest (Tabelle 8) und den angeschlossenen Langzeitstandtest (Tabelle 9). Da bei einigen Spurenelementen Werte zwischen Nachweisgrenze (0,5 µg/l) und Bestimmungsgrenze (1 µg/l) zur Verfügung gestellt wurden, wird in den Tabellen für diese Elemente die Anzahl der Messwerte unter 0,5 µg/l und im Bereich 0,5 bis 1 µg/l ausgewiesen. Eine Auswertung wurde vorgenommen, wenn 50 % der Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze von 1 µg/l und / oder 75 % Daten über der Nachweisgrenze lagen. Bei Molybdän und Selen wurde zu Versuchsbeginn bei fast allen Versuchen eine Auslaugung festgestellt. Hier erfolgte die Auswertung auch bei nur  $\geq 4$  Messwerten über der Bestimmungsgrenze, allerdings nur für die ersten Elutionsschritte.

Für alle Versuchsreihen wurde die kumulative Freisetzung nach 24 Stunden und nach 57 Tagen berechnet. Für Stoffe, die in einem Teil der Eluate nachgewiesen wurden, ist neben der maximalen Freisetzung, die sich ergibt, wenn die nicht messbaren Eluatkonzentrationen auf die Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenzen gesetzt werden, auch die minimale Freisetzung angegeben, bei der die nicht nachweisbaren Konzentrationen zu Null gesetzt werden. Die Ergebnisse sind im Anhang in den Tabellen A17 und A18 enthalten.

**Tabelle 8:** Beurteilung der Eluatkonzentrationen im Frischbetonstandtest hinsichtlich einer Auswertung des Freisetzungsverlaufs (Doppelbestimmung)

Parameter	Konzentrationsbereich	Anzahl der Messwerte bei Beton (Gesamtanzahl jeweils 12)						Auswertung
		M 10	M 20	M 30	M 11	M 12	M 13	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sb	< 1 µg/l	12	12	12	12	12	12	entfällt
As	< 1 µg/l	12	12	–	12	12	–	entfällt
Ba	< 1 µg/l	0	0	0	0	0	0	alle Betone
	≥ 1 µg/l	12	12	12	12	12	12	
Pb	< 0,5 µg/l	12	12	12	10	12	0	M 13
	0,5 - < 1 µg/l	0	0	0	2	0	12	
Cd	< 0,5 µg/l	12	12	–	12	12	–	entfällt
Cr	< 0,5 µg/l	0	0	0	0	0	0	alle Betone
	0,5 - < 1 µg/l	2	2	4	1	0	4	
	≥ 1 µg/l	10	10	8	11	12	8	
Co	< 0,5 µg/l	12	12	6	11	11	12	entfällt
	0,5 - < 1 µg/l	0	0	6	1	1	0	
Cu	< 0,5 µg/l	6	12	0	12	12	0	M30, M13
	0,5 - < 1 µg/l	5	0	6	0	0	0	
	≥ 1 µg/l	1	0	6	0	0	12	
Mo	< 1 µg/l	8	8	6	2	2	10	M 10, M 20, M 30, M 11, M 12 <sup>1)</sup>
	≥ 1 µg/l	4	4	6	10	10	2	
Ni	< 0,5 µg/l	12	11	10	12	11	0	M 13
	0,5 - < 1 µg/l	0	1	2	0	1	0	
	≥ 1 µg/l	0	0	0	0	0	12	
Hg	< 0,1 µg/l	12	12	–	12	12	–	entfällt
Se	< 1 µg/l	8	4	0	2	4	1	alle Betone <sup>1)</sup>
	≥ 1 µg/l	4	8	12	10	8	11	
Tl	< 1 µg/l	12	12	12	12	12	5	M 13 <sup>1)</sup>
	≥ 1 µg/l	0	0	0	0	0	7	
V	< 0,5 µg/l	1	3	0	2	1	0	alle Betone
	0,5 - < 1 µg/l	8	5	8	4	4	7	
	≥ 1 µg/l	3	4	4	6	7	5	
Zn	< 0,5 µg/l	2	4	11	7	5	0	M 10, M 13
	0,5 - < 1 µg/l	3	6	1	3	4	3	
	≥ 1 µg/l	7	2	0	1	3	9	

1) Messbare Konzentrationen traten z. T. nur in den ersten Eluaten auf. Eine Auswertung erfolgt nur für die relevanten Elutionsschritte.

–: nicht bestimmt

**Tabelle 9:** Beurteilung der Eluatkonzentrationen im angeschlossenen Langzeitstandtest hinsichtlich einer Auswertung des Freisetzungsverlaufs (Doppelbestimmung)

Parameter	Konzentrationsbereich	Anzahl der Messwerte bei Beton (Gesamtanzahl jeweils 12)						Auswertung
		M 10	M 20	M 30	M 11	M 12	M 13	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sb	< 1 µg/l	11	12	6	10	11	6	M 30, M 13
	≥ 1 µg/l	1	0	6	2	1	6	
As	< 1 µg/l	12	12	–	12	12	–	entfällt
Ba	< 1 µg/l	0	0	0	0	0	0	alle Betone
	≥ 1 µg/l	12	12	12	12	12	12	
Pb	< 0,5 µg/l	12	12	12	10	12	7	entfällt
	0,5 - < 1 µg/l	0	0	0	2	0	4	
	≥ 1 µg/l	0	0	0	0	0	1	
Cd	< 0,5 µg/l	12	12	–	12	12	–	entfällt
Cr	< 0,5 µg/l	0	0	0	0	2	0	alle Betone
	0,5 - < 1 µg/l	2	2	3	3	0	0	
	≥ 1 µg/l	10	10	9	9	10	12	
Co	≤ 0,5 µg/l	12	12	12	12	12	12	entfällt
Cu	< 0,5 µg/l	8	3	0	3	5	0	M 20, M 30, M 11, M 12, M 13
	0,5 - < 1 µg/l	2	7	8	4	2	4	
	≥ 1 µg/l	2	2	4	5	5	8	
Mo	< 1 µg/l	12	12	12	12	12	12	entfällt
Ni	< 0,5 µg/l	10	2	10	6	6	3	M 20, M 13
	0,5 - < 1 µg/l	2	10	2	6	6	1	
	≥ 1 µg/l	0	0	0	0	0	8	
Hg	< 0,1 µg/l	12	12	–	12	12	–	entfällt
Se	< 1 µg/l	10	5	5	5	8	6	M 20, M 30, M 11, M 13 <sup>1)</sup>
	≥ 1 µg/l	2	7	7	7	4	6	
Tl	< 1 µg/l	12	12	8	12	12	10	entfällt
	≥ 1 µg/l	0	0	4	0	0	2	
V	< 0,5 µg/l	0	1	0	2	2	0	alle Betone
	0,5 - < 1 µg/l	6	5	5	3	4	1	
	≥ 1 µg/l	6	6	7	7	6	11	
Zn	< 0,5 µg/l	11	9	11	9	6	3	M 13
	0,5 - < 1 µg/l	1	2	1	3	6	6	
	≥ 1 µg/l	0	1	0	0	0	3	

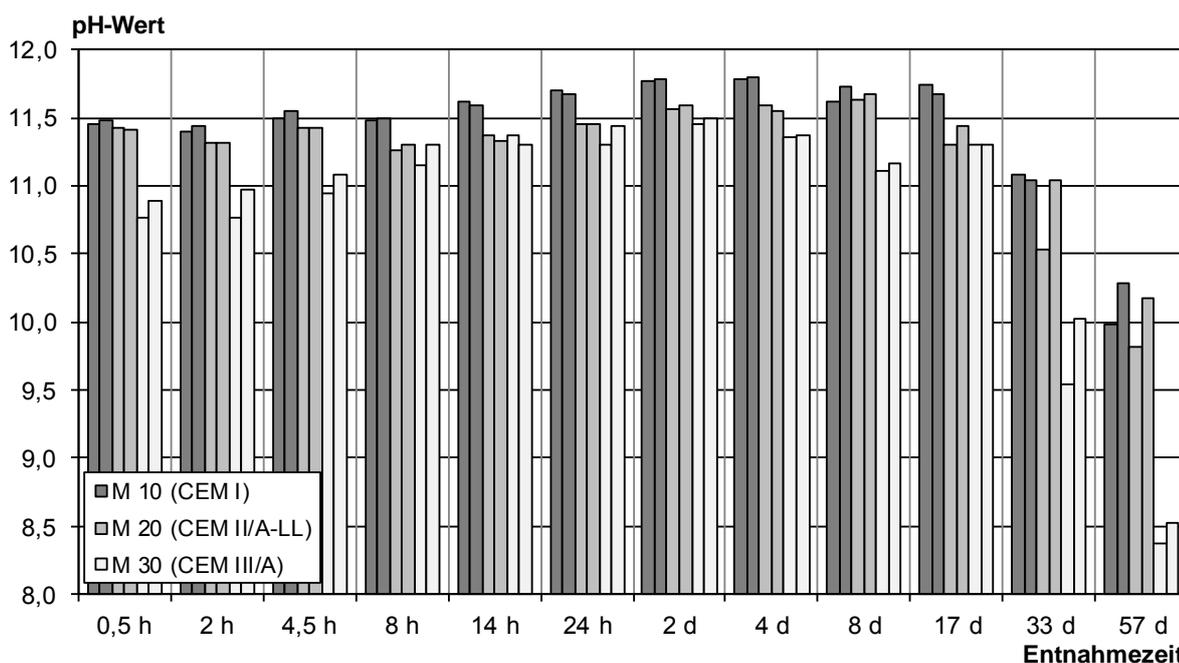
1) In der Regel werden in den letzten beiden Elutionsschritten keine messbaren Konzentrationen mehr festgestellt. Diese Schritte werden daher bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

–: nicht bestimmt

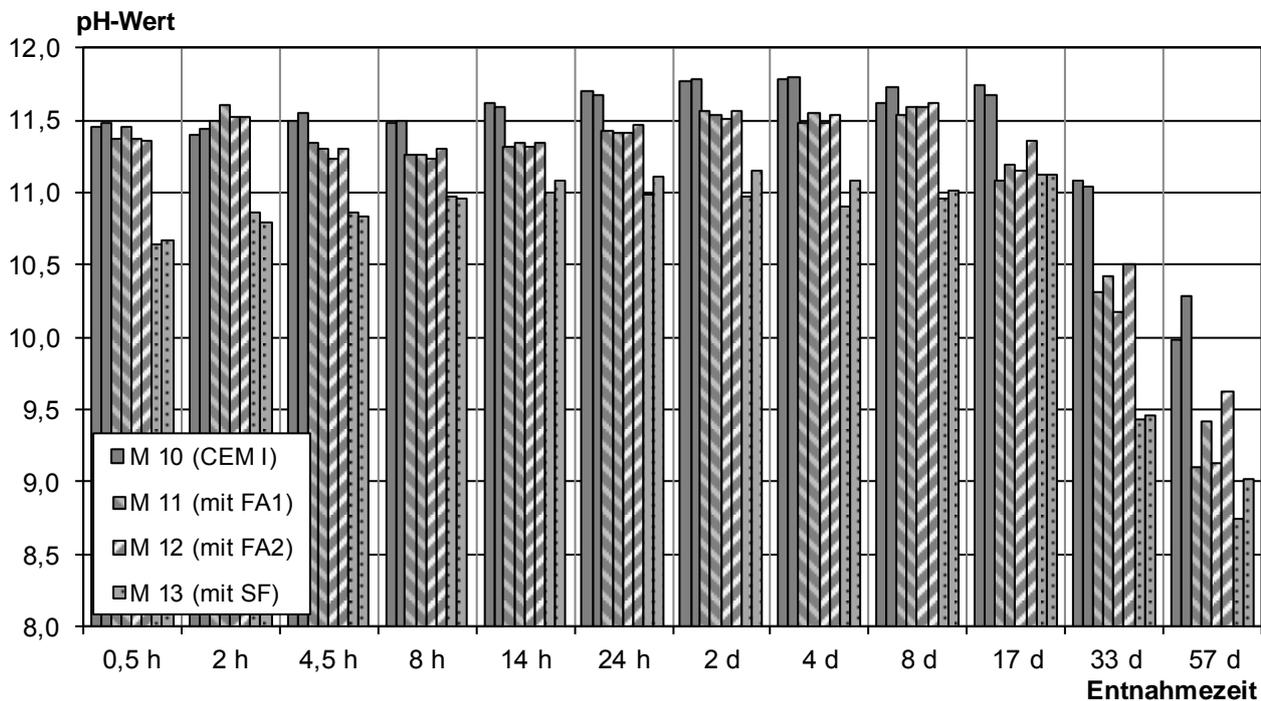
## 4.2.2 pH-Wert, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit

Die pH-Werte des deionisierten Wassers liegen zwischen 5,7 und 7,0. Der Verlauf der pH-Werte der Eluate der Betone ist in den Bildern 9 und 10 dargestellt. Bild 9 zeigt die pH-Werte bei den Betonen M 10, M 20 und M 30, Bild 10 die pH-Werte der zusatzstoffhaltigen Mischungen im Vergleich zur Referenz M 10. Alle Betone zeigen zum Versuchsende, insbesondere in den letzten beiden Eluaten abnehmende pH-Werte. Dies kann auf die bereits erfolgte Auslaugung im oberflächennahen Bereich oder eine leichte Karbonatisierung durch Luftzutritt zurückzuführen sein.

Die Betone M 10 und M 20 unterscheiden sich aufgrund des geringen Kalksteingehalts des CEM II/A-LL nur wenig. Tendenziell werden bei M 20 weniger Hydroxid-Ionen ausgeaugt. Der Beton aus Hochofenzement (M 30) setzt deutlich weniger Hydroxid-Ionen frei. Bei dieser Mischung werden im letzten Eluat nur noch pH-Werte im leicht alkalischen Bereich erreicht. Die Verwendung der Betonzusatzstoffe reduziert die Auslaugung der Hydroxid-Ionen ebenfalls. Aufgrund der höheren Reaktivität ist die Wirkung von Silikastaub stärker als von Flugasche. Während Silikastaub schon im ersten Eluat zu einer deutlichen Erniedrigung der pH-Wert führt, senkt die Flugasche den pH-Wert in den ersten 9 Eluaten um maximal 0,3 im Vergleich zur Referenz ab. Erst in den letzten Eluaten sind größere Unterschiede zu festzustellen.



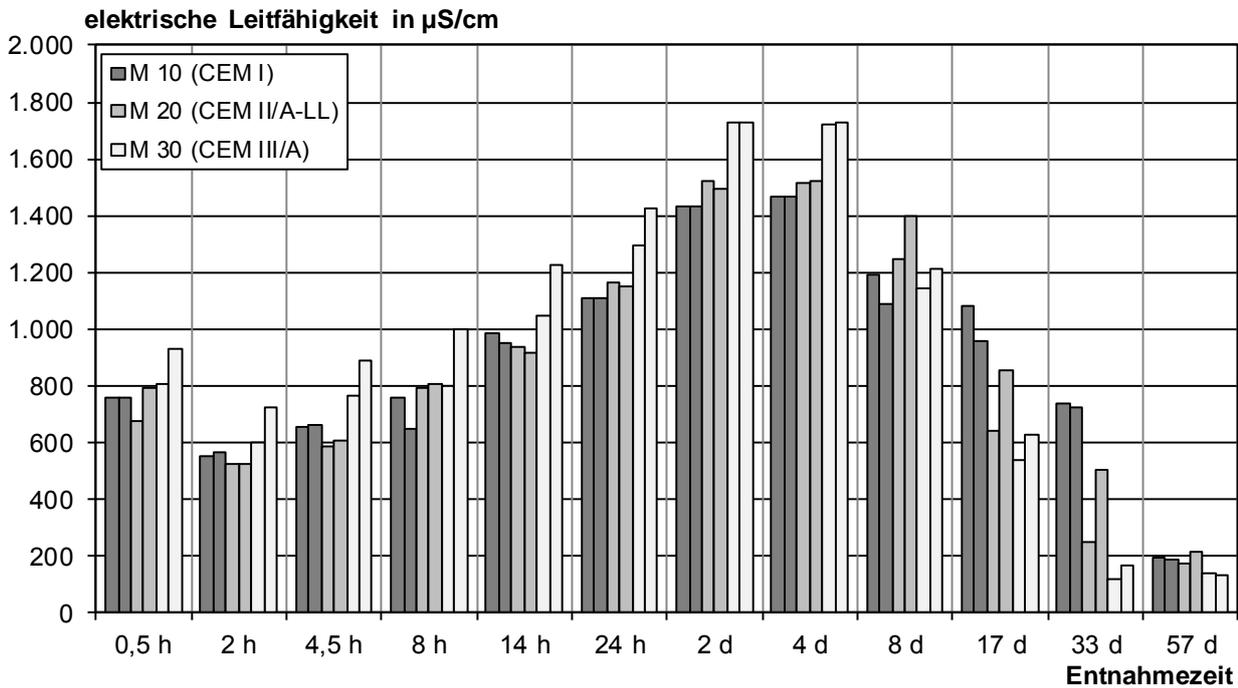
**Bild 9:** pH-Werte der Eluate aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest – Betone ohne Betonzusatzstoffe



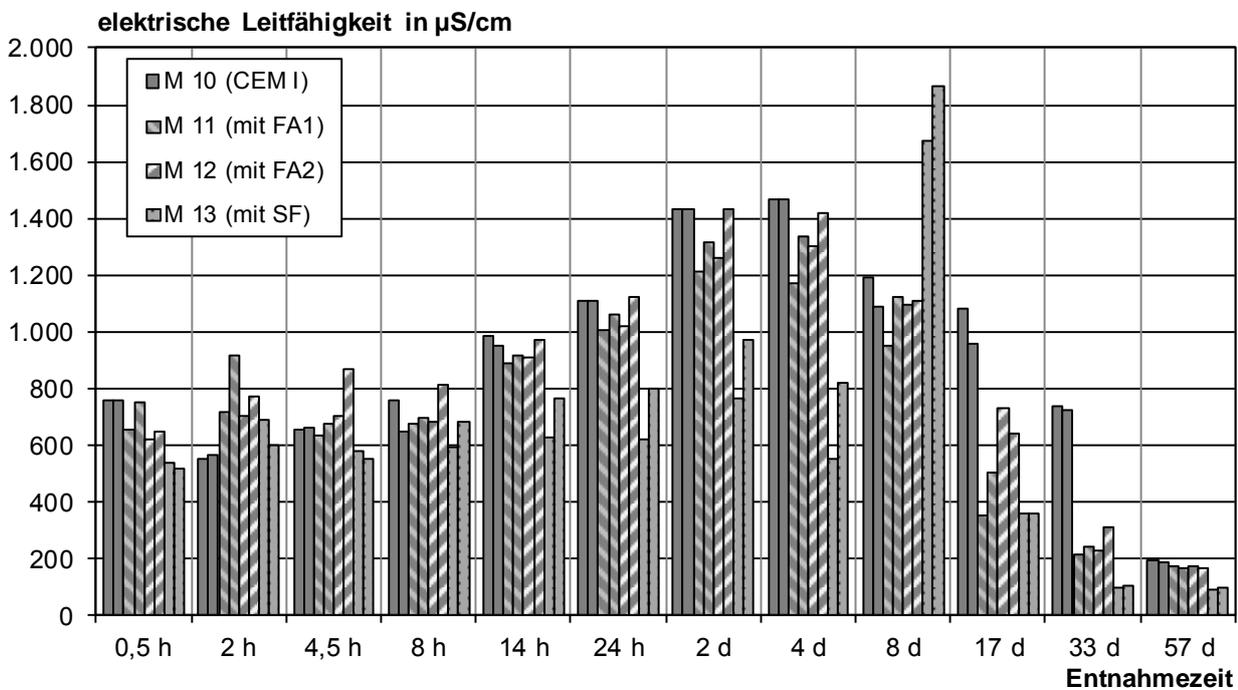
**Bild 10:** pH-Werte der Eluate aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest – Betone mit Betonzusatzstoffen im Vergleich zur Referenz M 10

Der pH-Wert in den Eluaten korreliert offenbar mit dem Portlanditgehalt der Betone. Dieser ist bei Mischung M 30 aufgrund des geringeren Klinkeranteils niedriger bei den puzzolanischen Zusatzstoffen schlägt sich der Verbrauch des Portlandits nieder, der bei Silikastaub sehr früh, bei Flugasche erst im späteren Verlauf der Hydratation beginnt.

Die elektrische Leitfähigkeit wird stark vom pH-Wert beeinflusst, wie aus den Bildern 11 und 12 ersichtlich. In den ersten vier Elutionsschritten sind die elektrische Leitfähigkeiten nahezu konstant. Durch die längeren Kontaktzeiten ergeben sich bei den folgenden Eluaten steigende elektrische Leitfähigkeiten. Die höchsten Werte ergeben sich im siebenten (2 d) bzw. achten (4 d) Eluat. Anschließend sinken die elektrischen Leitfähigkeiten wieder ab. Bei der Mischung M 13 (Bild 12) ergaben sich im neunten Eluat (8 d) erhöhte Leitfähigkeiten, die durch die pH-Werte oder die Konzentrationen der analysierten Ionen nicht zu erklären sind. Möglicherweise liegen hier Messfehler oder eine Kontamination bei der Messung vor.

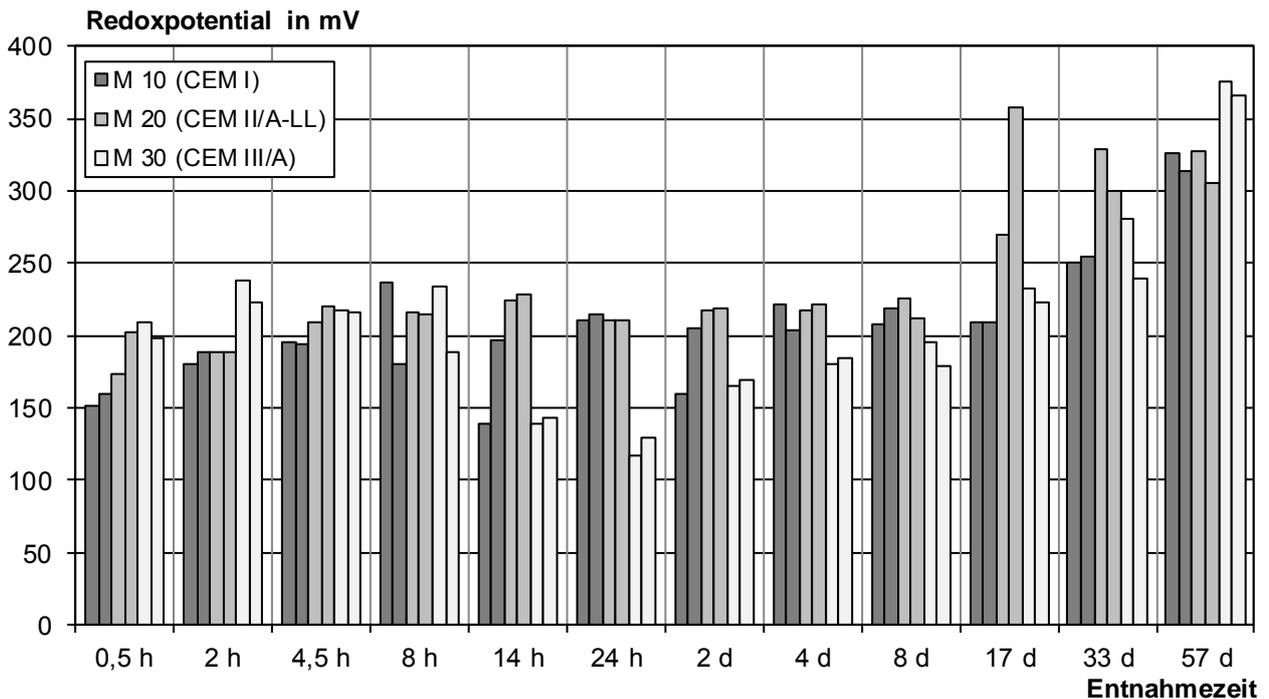


**Bild 11:** Elektrische Leitfähigkeiten der Eluate aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest – Betone ohne Betonzusatzstoffe

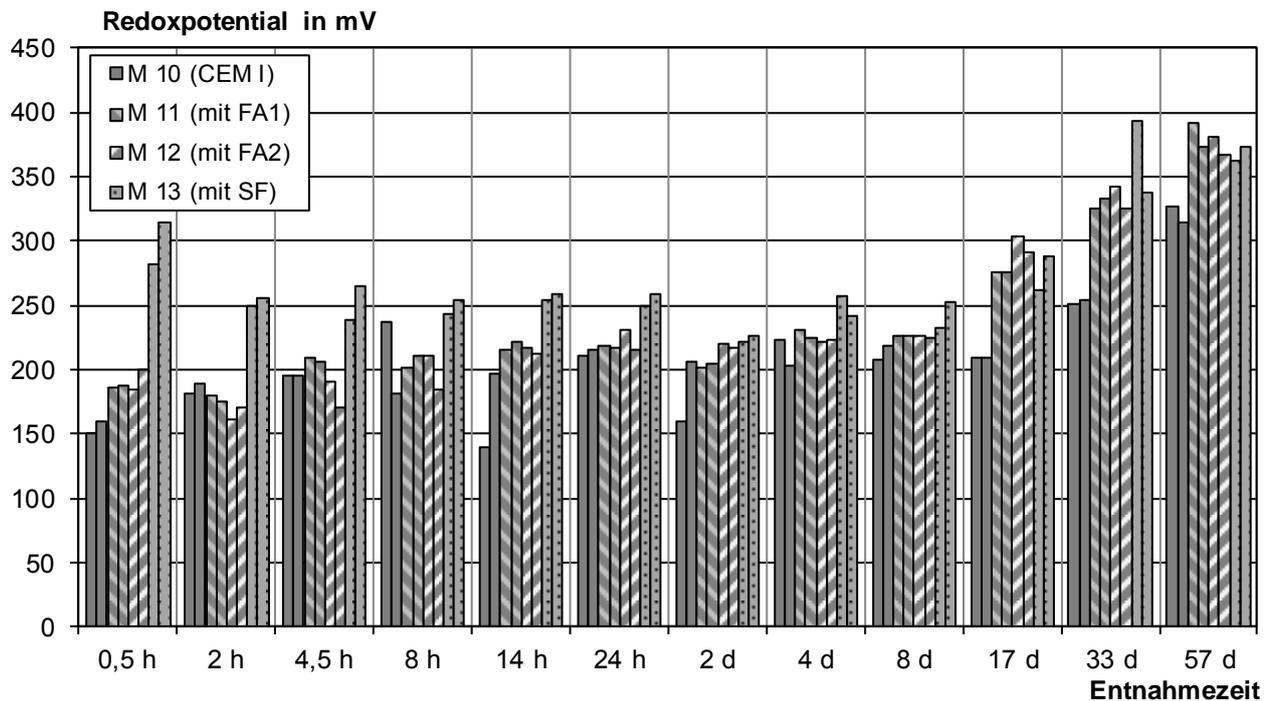


**Bild 12:** Elektrische Leitfähigkeiten der Eluate aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest. – Betone mit Betonzusatzstoffen im Vergleich zur Referenz M 10

Das Redoxpotential im deionisierten Wasser betrug ca. 400 mV. Durch die Auslaugung wird das Redoxpotential in den ersten neun Eluaten deutlich reduziert. Gegen Ende des Versuchs steigen die Werte an und nähern sich dem Blindwert. Die Mischung M 13 zeigt in den ersten Eluaten relativ hohe Redoxpotentiale.



**Bild 13:** Redoxpotentiale der Eluate aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest – Betone ohne Betonzusatzstoffe



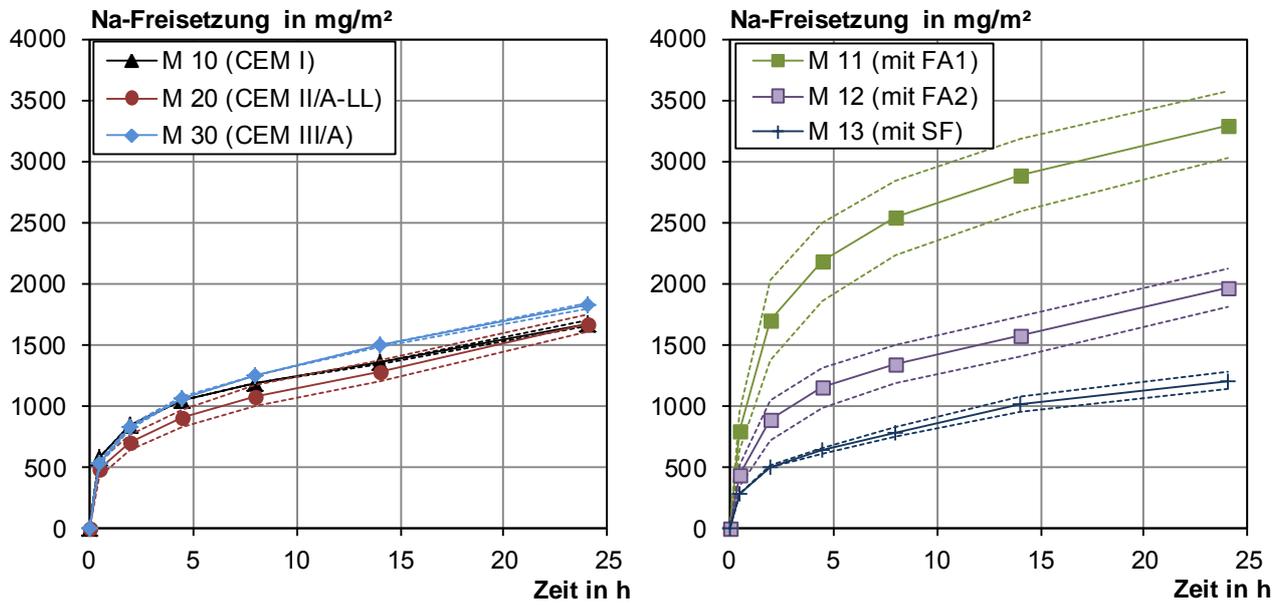
**Bild 14:** Redoxpotentiale der Eluate aus dem Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest – Betone mit Betonzusatzstoffen im Vergleich zu M 10

## 4.2.3 Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat

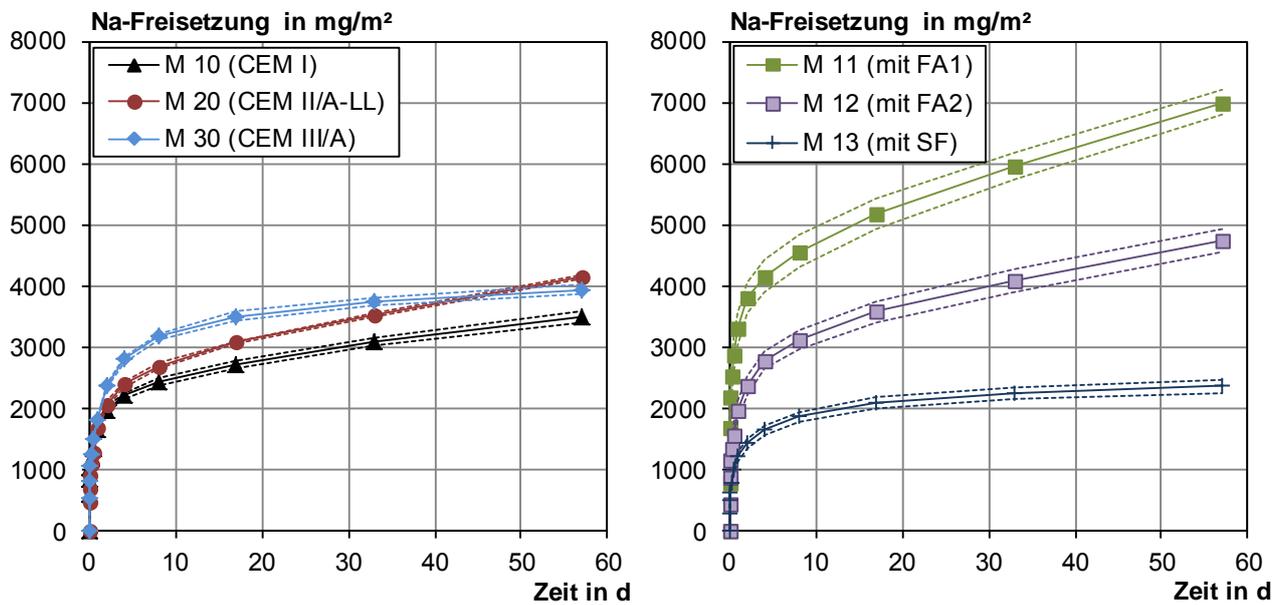
### 4.2.3.1 Freisetzung

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben wurden anhand der Eluatkonzentrationen die kumulativen Freisetzungen der analysierten Stoffe berechnet (s. Gleichung (2)). Die Natriumfreisetzung ist in Bild 15 separat für die Frischbetonphase und in Bild 16 für den gesamten Versuch dargestellt. Die drei Zemente unterscheiden sich bzgl. der Natriumfreisetzung nur geringfügig. Die Betonzusatzstoffe beeinflussen die Freisetzung dagegen deutlich. Die Zugabe der Flugaschen, insbesondere FA1, erhöht die Freisetzung, während Silikastaub die Auslaugung von Natrium reduziert.

Aus der Literatur ist bekannt, dass Flugaschen den Natriumgehalt der Porenlösung insbesondere zu Hydratationsbeginn erhöhen können, im weiteren Verlauf erfolgt häufig eine Einbindung in die Hydratationsprodukte (s. z. B. /DeW11/, /Sch04/). Die Zugabe von Silikastaub reduziert den Natriumgehalt der Porenlösung. Neben Natrium, das aus dem Silikastaub stammt, wird auch Natrium aus dem Klinker in die Hydratationsprodukte eingebaut /Bra07b/, /Sch04/, /Duc00/. Die Einflüsse der Zusatzstoffe auf die Porenlösung schlagen sich im Auslaugversuch nieder.



**Bild 15:** Kumulative Freisetzung von Natrium im Frischbetonstandtest

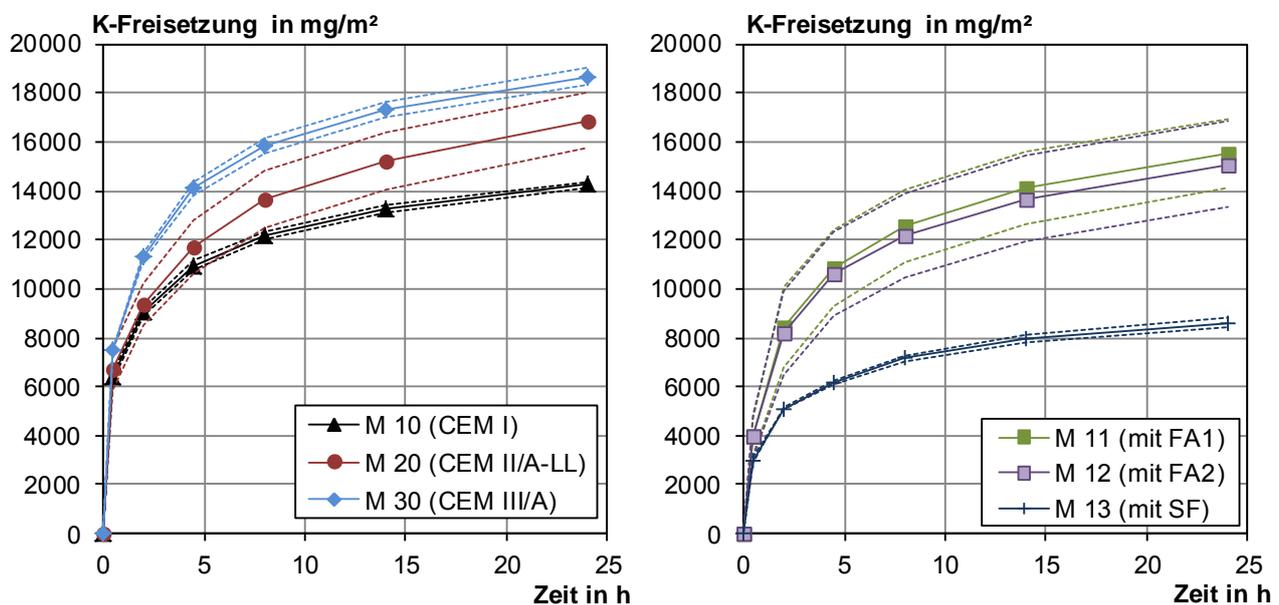


**Bild 16:** Kumulative Freisetzung von Natrium im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

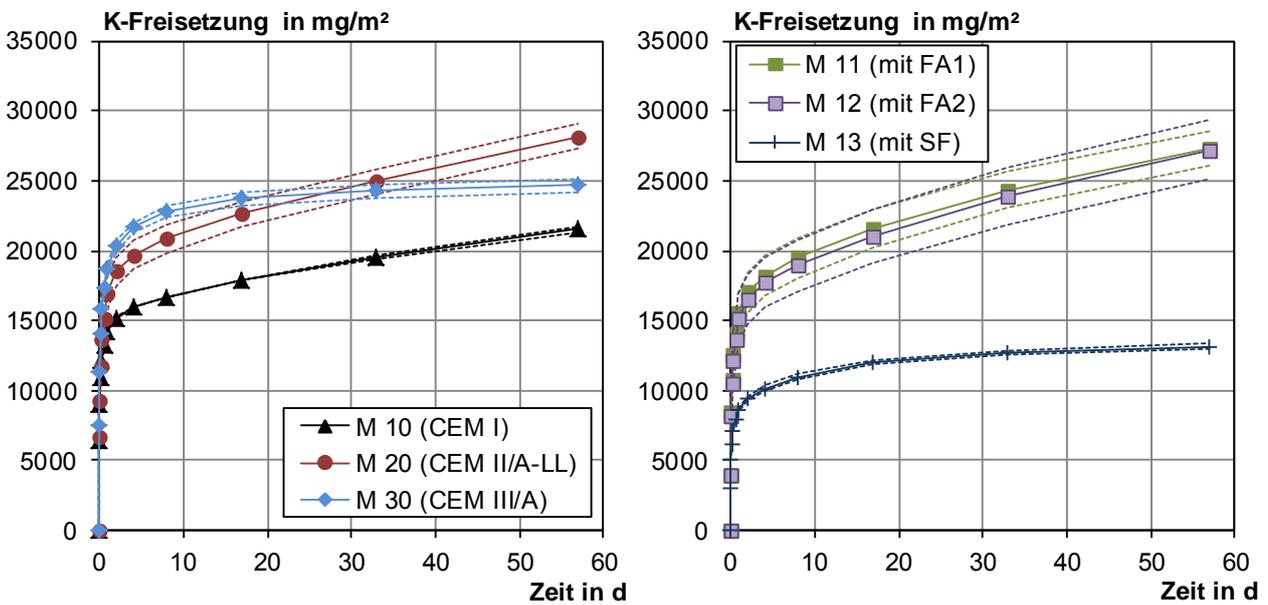
Die Kalium-Freisetzung werden in Bildern 17 und 18 dargestellt. Der Vergleich der drei Zemente (jeweils links in den Bildern dargestellt) zeigt, dass der Portlandzement die geringste Freisetzung zeigt, obwohl die Gesamtgehalte am höchsten sind. Offenbar sind die leicht löslichen Kaliumanteile bei den anderen beiden Zementen höher. Der Hochofenzement zeigt sowohl bei Kalium als auch bei Natrium nach knapp 20 d nur noch sehr geringe Freisetzungen (s. Bild 17). Dies ist wahrscheinlich auf die für dieses Bindemittel typische hohe Gefügedichtheit zurückzuführen.

Im Frischbetonstandtest zeigen die flugaschehaltigen Mischungen nur unwesentlich höhere Freisetzungen als die Referenzmischung M 10 (s. Bild 17). Während der Festbetonphase nimmt die Freisetzung bei den flugaschehaltigen Mischungen allerdings zu, so dass bei Versuchsende die Freisetzung gut 25 % über der Referenz M 10 liegt.

Die Zugabe von Silikastaub führt wie auch bei Natrium zu einer deutlichen Reduktion der Freisetzung. Nach 20 d werden nur noch geringfügige Mengen an Alkalien freigesetzt. Dies ist wahrscheinlich auf den hohen Gefügewiderstand zurückzuführen.

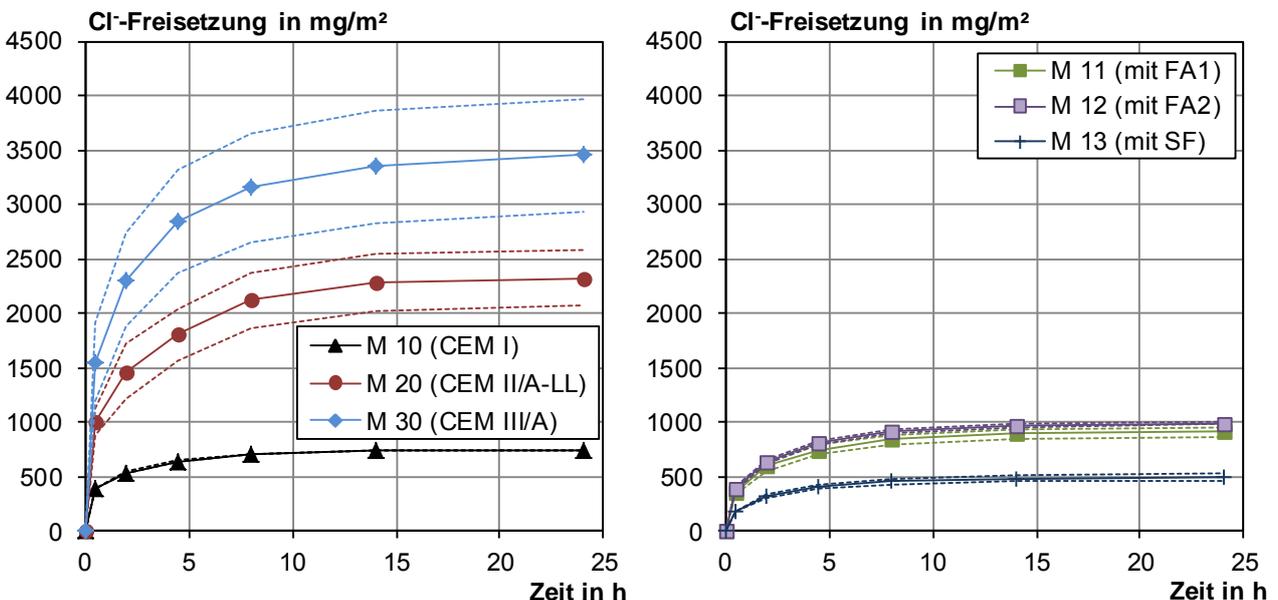


**Bild 17:** Kumulative Freisetzung von Kalium im Frischbetonstandtest

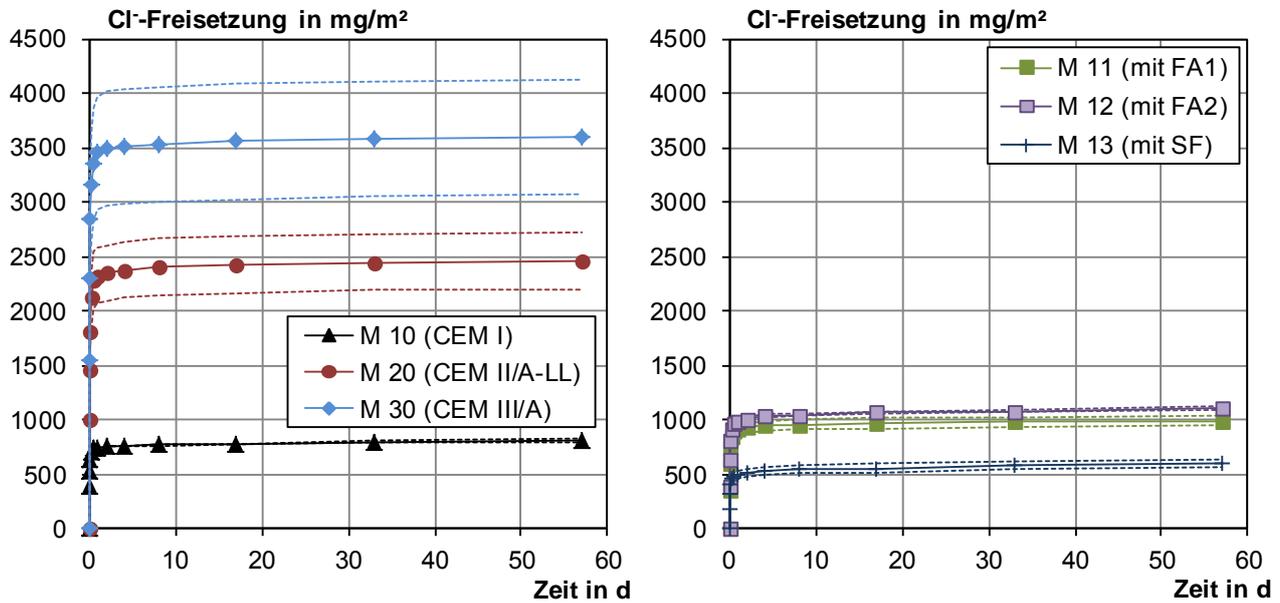


**Bild 18:** Kumulative Freisetzung von Kalium im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

Die Freisetzungen von Chlorid und Sulfat sind zu Beginn hoch und gehen nach dem vierten (8 h) bzw. fünften (14 h) Eluatwechsel zurück (s. Bilder 19 und 21). Die Chloridgehalte der drei Zemente sind sehr unterschiedlich, der Hochofenzement und der Portlandkalksteinzement liegen im Gesamtgehalt etwa eine Größenordnung über dem Portlandzement. Die Betone zeigen daher auch eine erhöhte Freisetzung. Die Flugaschen weisen ebenfalls höhere Gesamtgehalte auf, was zu einer leicht erhöhten Freisetzung im Vergleich zu Beton M 10 führt.

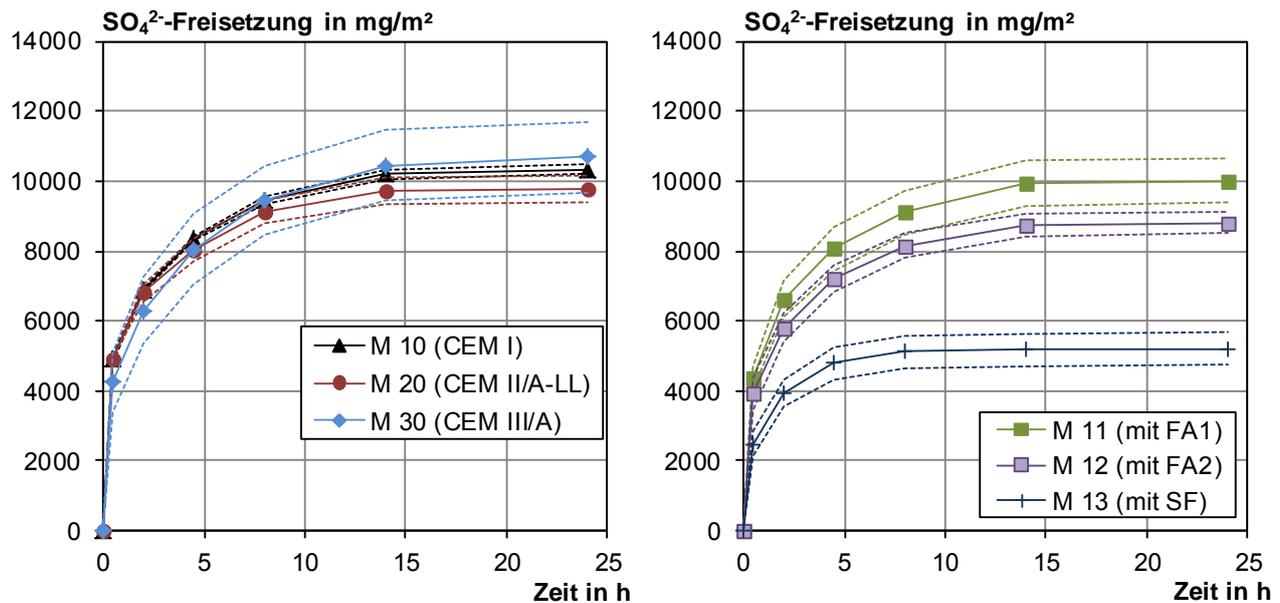


**Bild 19:** Kumulative Freisetzung von Chlorid im Frischbetonstandtest

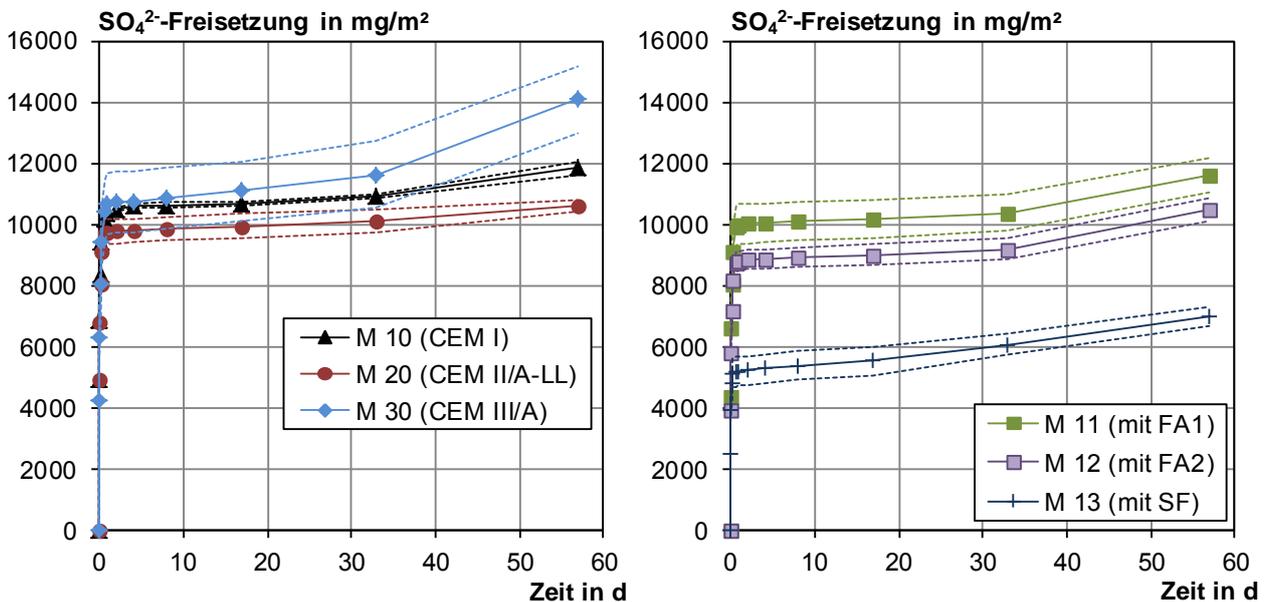


**Bild 20:** Kumulative Freisetzung von Chlorid im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

Die Mischung M 13 mit Silikastaub zeigt bereits im Frischbetonstandtest die geringste Freisetzung trotz relativ hoher Gesamtgehalte (s. Bild 19). Offenbar findet bereits frühzeitig eine Einbindung von Chlorid statt. Die Chloridauslaugung aus Festbeton ist bei allen Mischungen vernachlässigbar.



**Bild 21:** Kumulative Freisetzung von Sulfat im Frischbetonstandtest

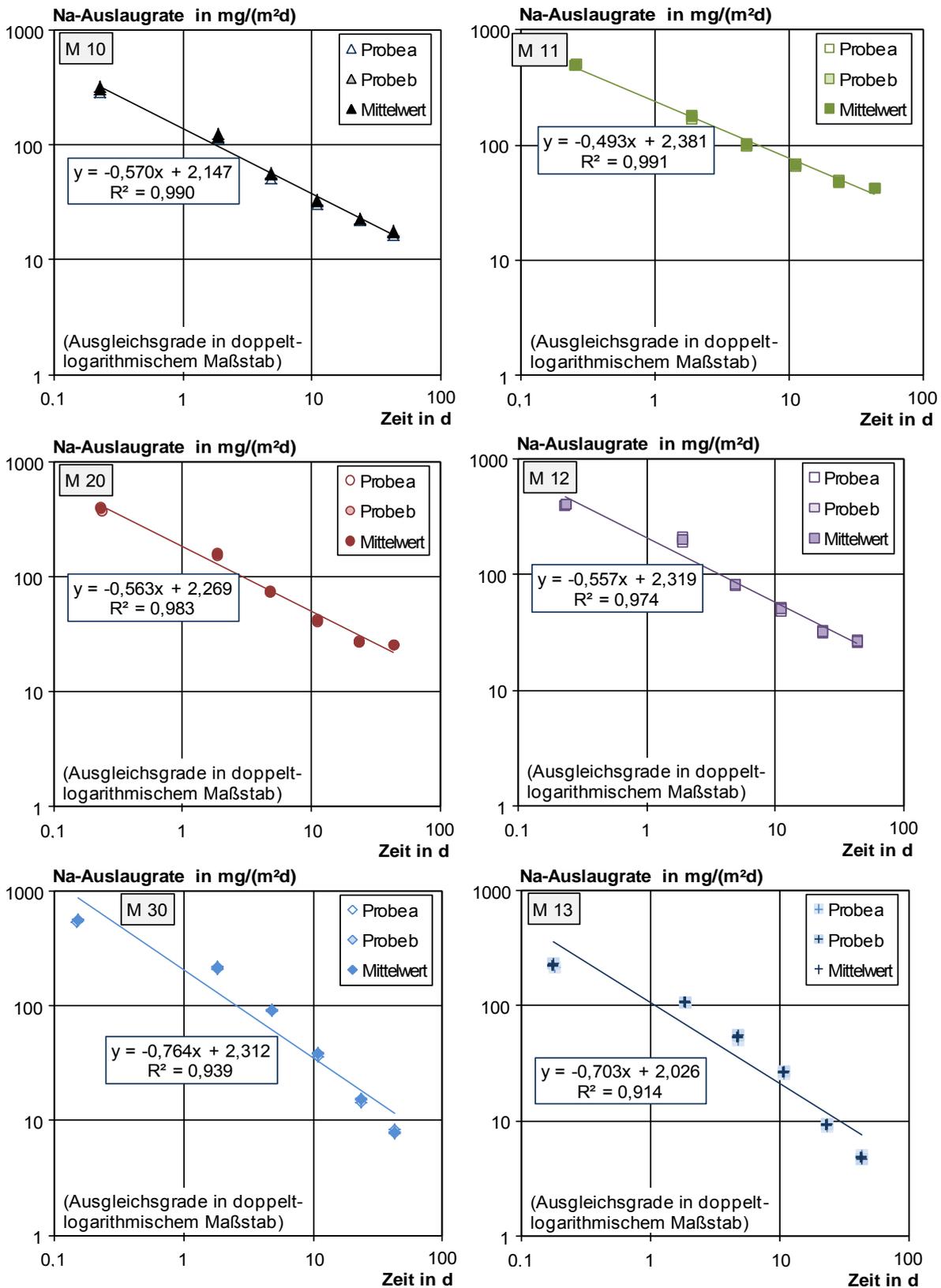


**Bild 22:** Kumulative Freisetzung von Sulfat im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

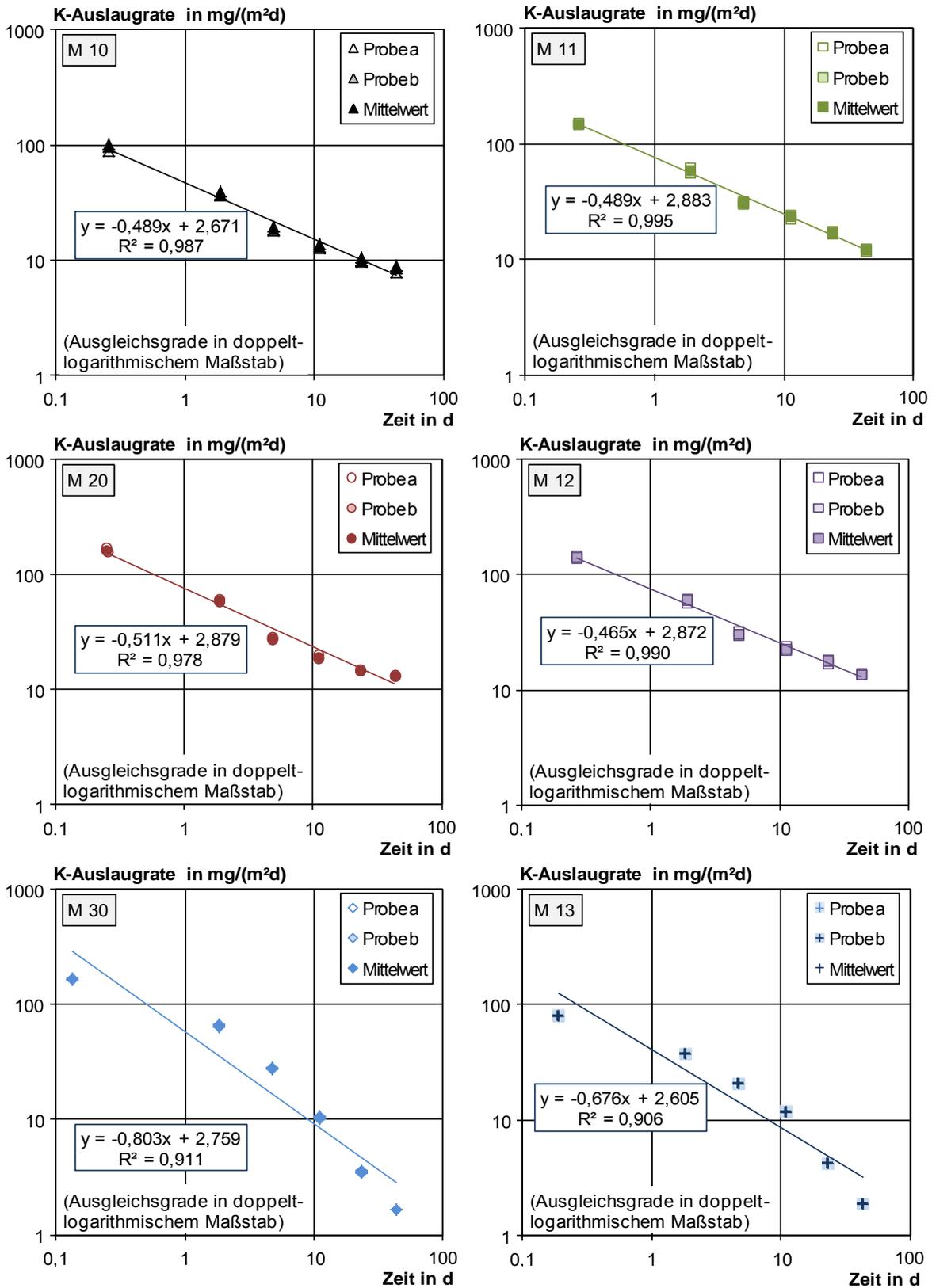
Die Sulfatfreisetzungen sind im Frischbetonstandtest bei den Betonen M 10, M 20, M 30, M 11 und M 12 sehr ähnlich. Lediglich M 13 zeigt eine verringerte Freisetzung (s. Bild 21). Bei der anschließenden Festbetonauslaugung ist in den letzten ein bis zwei Elutionschritten ein Anstieg der Freisetzung zu beobachten. Vermutlich tritt im oberflächennahen Bereich eine Zersetzung von Ettringit auf.

#### 4.2.3.2 Kinetik der Auslaugung aus Festbeton

Die Auslaugraten wurden für die Festbetonphase gemäß Abschnitt 3.1.2 berechnet und sind in den folgenden Bildern im doppellogarithmischen Maßstab über der Zeit aufgetragen (lgJ-lgt Diagramme). Bild 23 zeigt die Ergebnisse für Natrium, Bild 24 für Kalium. Für die Mischungen M 10, M 20, M 11 und M 12 wurden Steigungen zwischen -0,47 und -0,57 ermittelt. Diese Steigungen entsprechen in etwa einer diffusionskontrollierten Freisetzung mit zeitlich konstantem Diffusionskoeffizienten. Für die Mischungen M 30 und M 13 ist die Annäherung durch eine Ausgleichsgerade etwas schlechter, da die Auslaugrate im späteren Verlauf stärker abnimmt. Ein solches Verhalten ergibt sich, wenn der Diffusionskoeffizient im Verlauf des Versuchs abnimmt.



**Bild 23:** Natriumauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest



**Bild 24:** Kaliumauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest

Der Verlauf der Auslaugrate von Chlorid ist in Bild 25 dargestellt. Aufgrund der sehr geringen Chloridkonzentrationen sind bei diesem Parameter die Streuungen der Analytik höher. Dennoch werden zufriedenstellende Bestimmtheitsmaße der Ausgleichsgeraden erreicht. Die Auslaugrate fällt steiler ab als bei Natrium und Kalium. Es ergeben sich Steigungen im Bereich von -0,60 bis -0,70, lediglich bei M 10 ist die Steigung etwas flacher, was jedoch auch auf Streuungen zurückzuführen sein kann.

Für Sulfat ist in der doppeltlogarithmischen Darstellung kein linearer Verlauf zu beobachten. Bei allen Mischungen steigt die Auslaugrate zum Ende des Versuchs an (s. Bild 26). Aufgrund der Instabilität von Ettringit bei abnehmendem pH-Wert ist die Freisetzung von Sulfat stark pH-Wert-abhängig. Je nach Quelle werden pH-Werte zwischen 9 und 10,8 als untere Stabilitätsgrenze angegeben (s. Zusammenstellung in /Sta01/). Zum Vergleich zeigen die Diagramme in Bild 26 neben der Auslaugrate die pH-Werte der Eluate, letztere sind auf der Sekundärachse aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass der Anstieg der Sulfat-auslaugrate mit dem sinkenden pH-Wert korreliert. Die Abhängigkeit ist jedoch nicht stringent und bei den verschiedenen Mischungen unterschiedlich stark ausgeprägt. In welchem Umfang Ettringit zersetzt wird hängt nicht allein vom pH-Wert des Eluats ab, ein dichtes Zementsteingefüge kann dazu führen, dass nur in einer dünnen Grenzschicht der pH-Wert absinkt. Dies könnte den relativ geringen Anstieg bei der Mischung M 13 erklären.

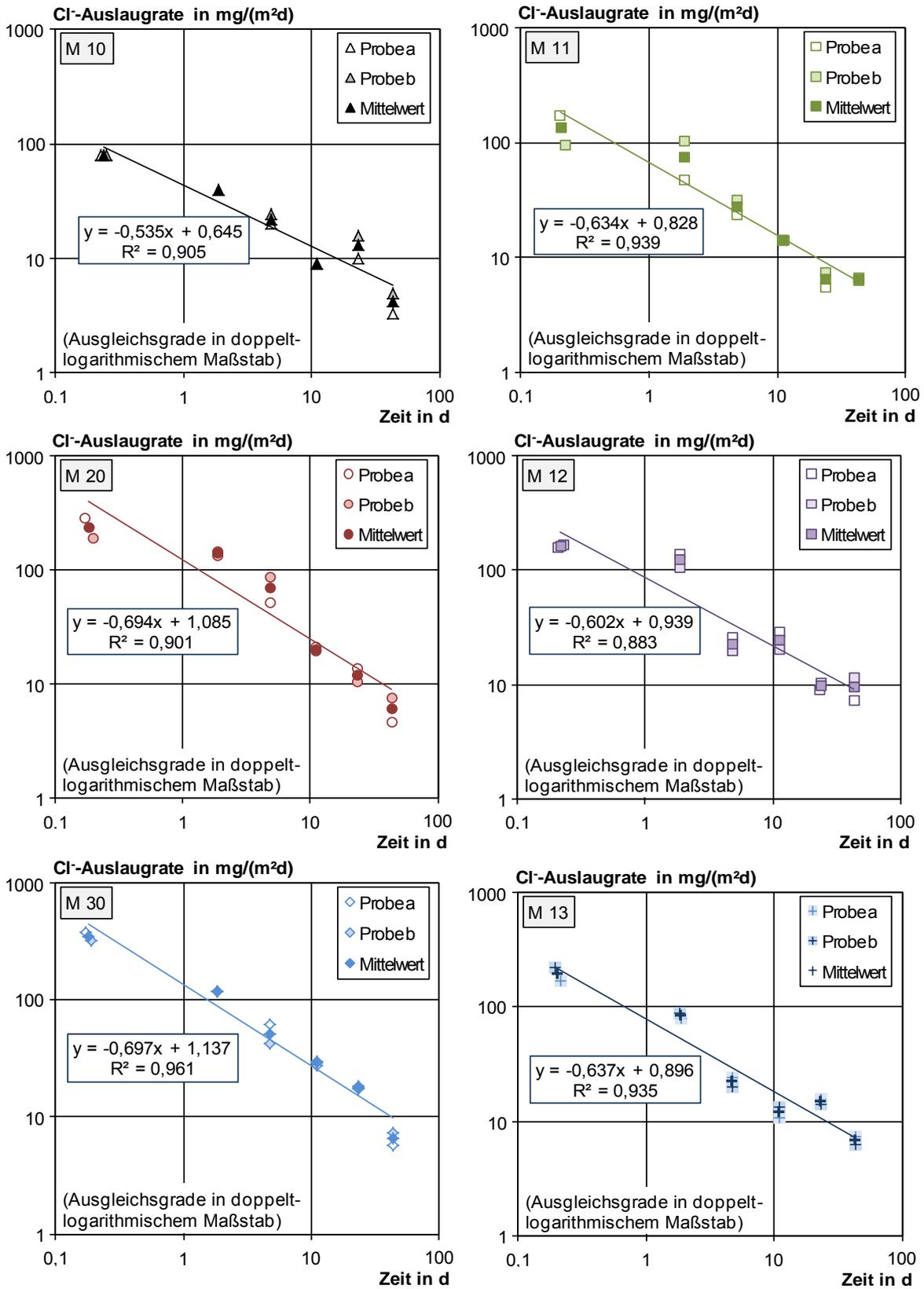
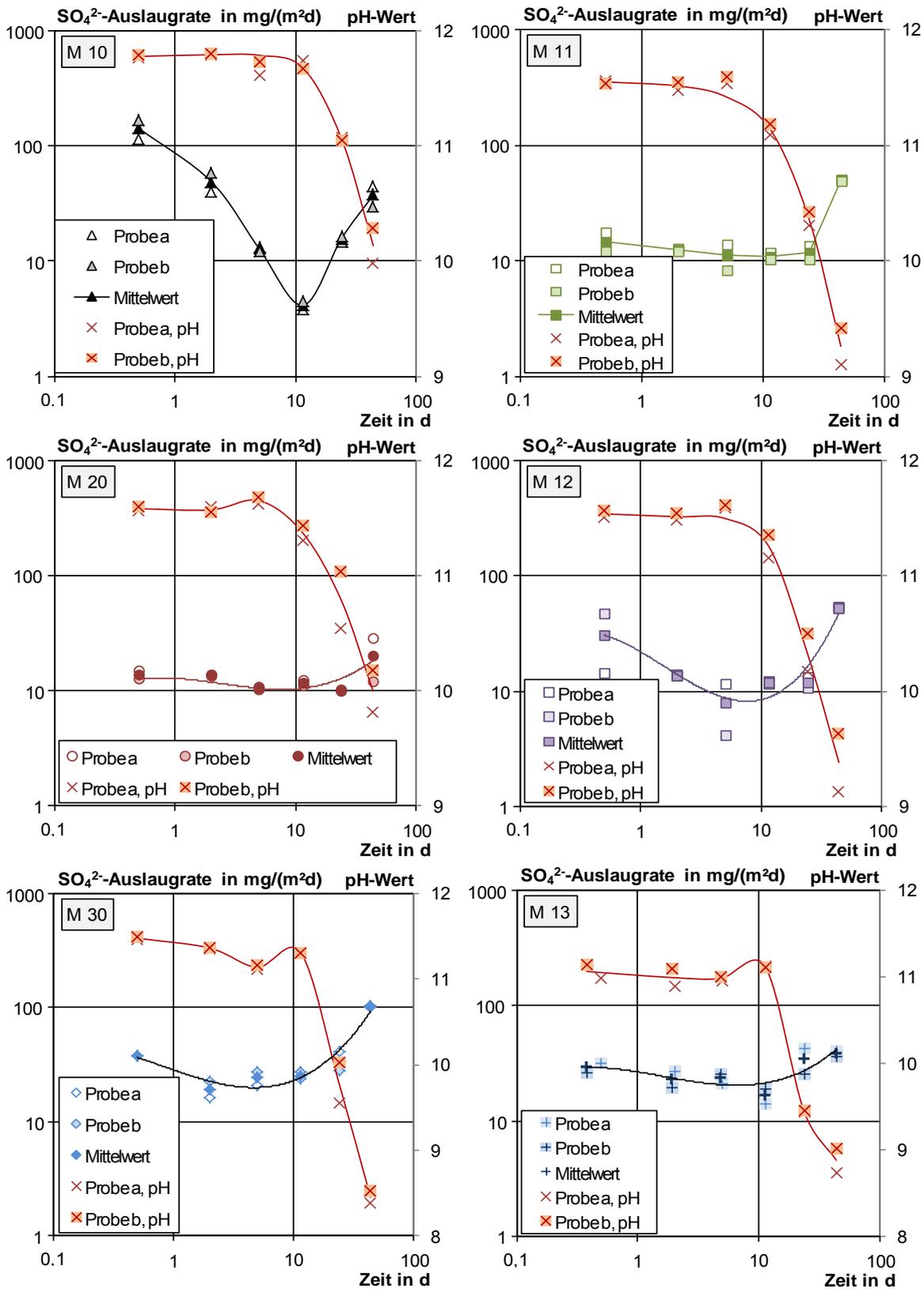


Bild 25 Chloridauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest



**Bild 26:** Sulfatauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest

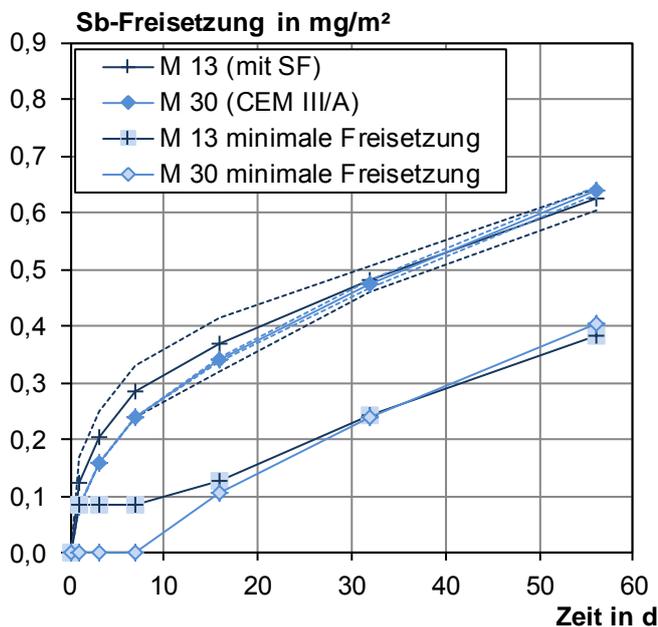
## **4.2.4 Spurenelemente und Barium**

### **4.2.4.1 Freisetzung**

In Abschnitt 4.2.1.2 wurden festgelegt, für welche Versuchsreihen und Parameter eine Auswertung sinnvoll ist. Die Elemente Arsen, Cadmium, Kobalt und Quecksilber waren bei allen Betonen unproblematisch, d. h. in der Regel nicht nachweisbar. Die Gehalte an Cadmium und Quecksilber in den Ausgangsstoffen sind sehr gering ( $< 0,6$  ppm im Bindemittel, s. Bild 8). Kobalt und Arsen sind dagegen insbesondere in den Flugaschebetonen in höherem Maße enthalten, offenbar sind die Elemente jedoch in der Glasmatrix eingebunden.

### **Antimon**

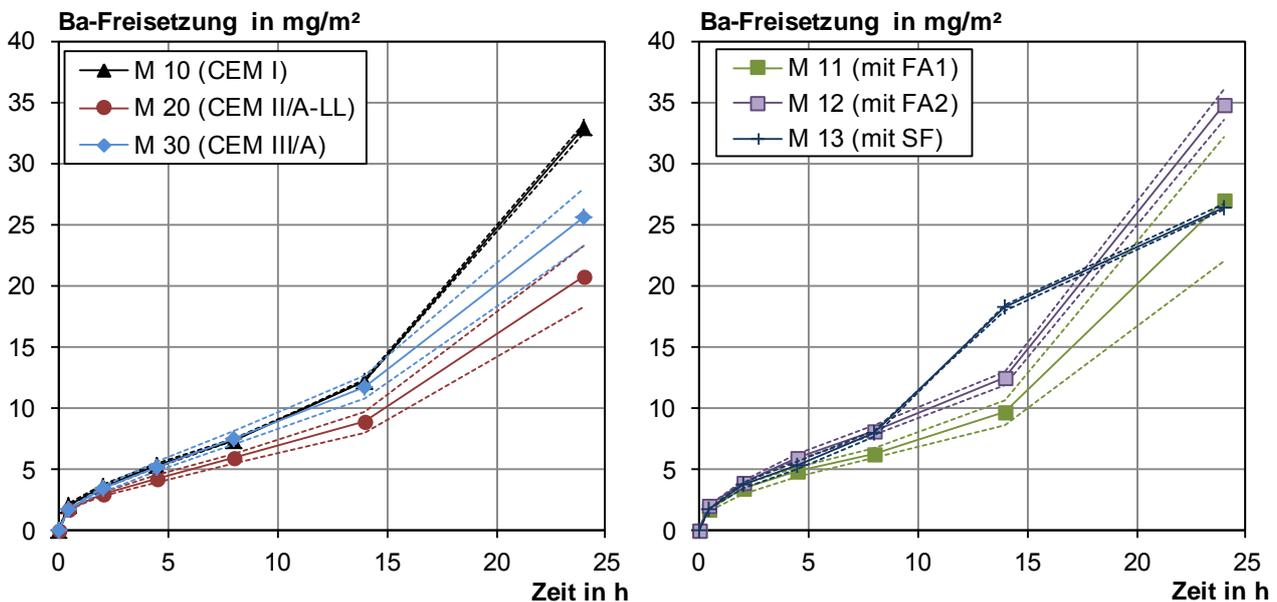
Für Antimon wurden im Frischbetonstandtest durchgehend Werte unter der Bestimmungsgrenze gefunden. Aus der vorangegangenen Forschungsarbeiten ist bekannt, dass Antimon in die Klinkerphasen, wahrscheinlich primär in Alit, eingebunden ist, und zu Hydratationsbeginn nur zu  $< 0,05$  ‰ in leicht löslicher Form vorliegt [Vol12]. Daher ist zu diesem Zeitpunkt keine messbare Freisetzung zu erwarten. Die Betone M 11 und M 12 weisen aufgrund der Flugaschen wesentlich höhere Antimongehalte im Bindemittel auf (vgl. Bild 8). Auch hier sind die Freisetzungen jedoch nicht messbar. D. h., auch in der Flugasche liegt Antimon in gebundener Form vor. Im anschließenden Langzeitstandtest wurden in den letzten Elutionsschritten für den Hochofenzementbeton M 30 und den Beton mit Silikastaub z. T. messbare Konzentrationen gefunden. Bild 27 zeigt die berechnete kumulative Freisetzung. Da eine Reihe von Eluatkonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze lagen, ist neben der maximal möglichen Freisetzung auch die minimale Freisetzung dargestellt, die sich ergibt, wenn die Werte  $< 1$  µg/l zu Null angenommen werden. Die Freisetzung liegt bei beiden Mischungen zwischen  $0,4$  und  $0,6$  mg/m<sup>2</sup> und ist damit sehr gering.



**Bild 27:** Kumulative Freisetzung von Selen im angeschlossenen Langzeitstandtest (Vernachlässigung der Freisetzung im Frischbetonstandtest)

## Barium

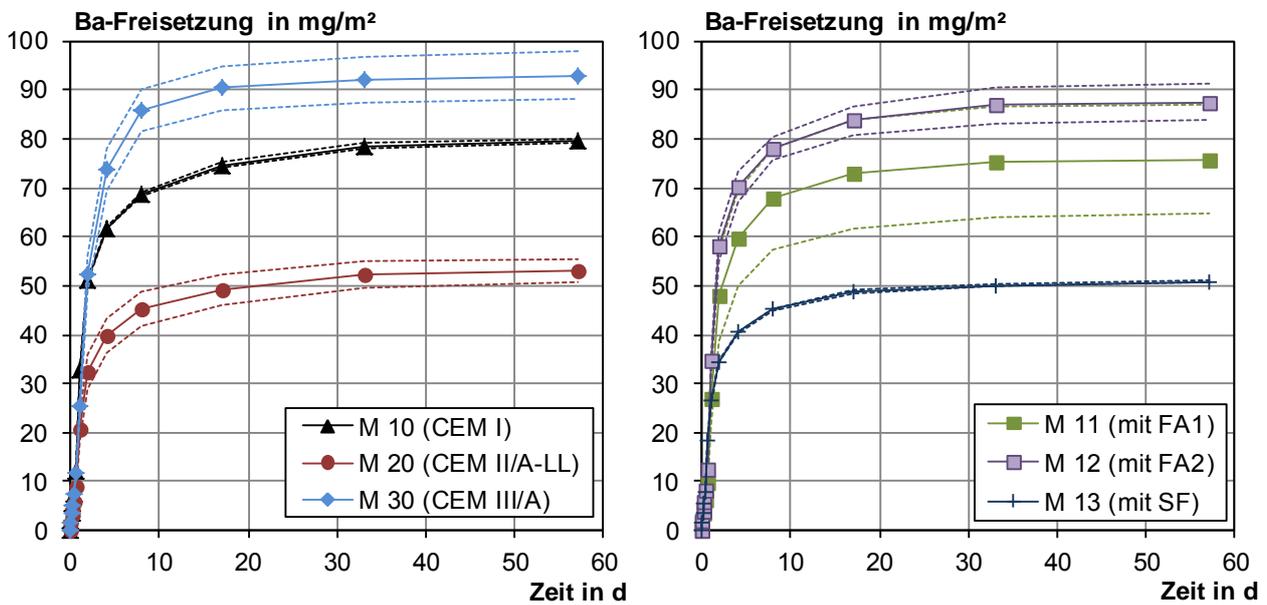
Barium ist kein Spurenelement und daher in den Ausgangsstoffen in wesentlich höheren Mengen enthalten (s. Bild 8). Aus diesem Grund war die Auslaugung bei allen Betonen in allen Eluatn gut messbar. Bild 28 zeigt die Freisetzungen während der Frischbetonphase. Die Reproduzierbarkeit ist meist sehr gut, nur bei der Mischung M 11 ergab sich bei den letzten Eluatn des Frischbetonstandtests eine etwas größere Differenz. Die Graphen zeigen den für Barium typischen Anstieg der Freisetzung, der zwischen 10 und 15 Stunden beginnt. In /Vol12/ wurde gezeigt, dass dieser Anstieg auf den Rückgang der Sulfatkonzentration in der Porenlösung zurückzuführen ist. Mit der Wasserzugabe zum Zement lösen sich Gips und Halbhydrat und zeitverzögert auch Anhydrit. Daher ist die Sulfatkonzentration zu Beginn der Hydratation hoch. Durch die Bildung von Ettringit wird jedoch Sulfat verbraucht und die Sulfatkonzentration sinkt nach einiger Zeit drastisch ab. Der genaue zeitliche Verlauf hängt von der Feinheit und der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung des Zements ab. Durch die sinkende Sulfatkonzentration wird das Löslichkeitsprodukt von Bariumsulfat unterschritten und Bariumionen gehen in Lösung. Diese Prozesse in der Porenlösung schlagen sich im Auslaugversuch nieder.



**Bild 28:** Kumulative Freisetzung von Barium im Frischbetonstandtest

Der Vergleich der unterschiedlichen Bindemittel zeigt, dass bei dem silikastaubhaltigen Beton der Anstieg der Bariumfreisetzung etwas früher einsetzt. Vermutlich wird durch den Silikastaub die Zementhydratation beschleunigt. Bei den Betonen ohne Zusatzstoffe ist die Gesamtfreisetzung bei M 10 am höchsten, obwohl M 30 wesentlich höhere Gesamtgehalte aufweist. Offenbar ist das Barium im Hüttensand in geringerem Maße verfügbar als im Klinker. Die Flugaschebetone ähneln in ihrer Freisetzung der Referenz M 10, die höheren Gesamtgehalte der Flugasche sind demnach unproblematisch.

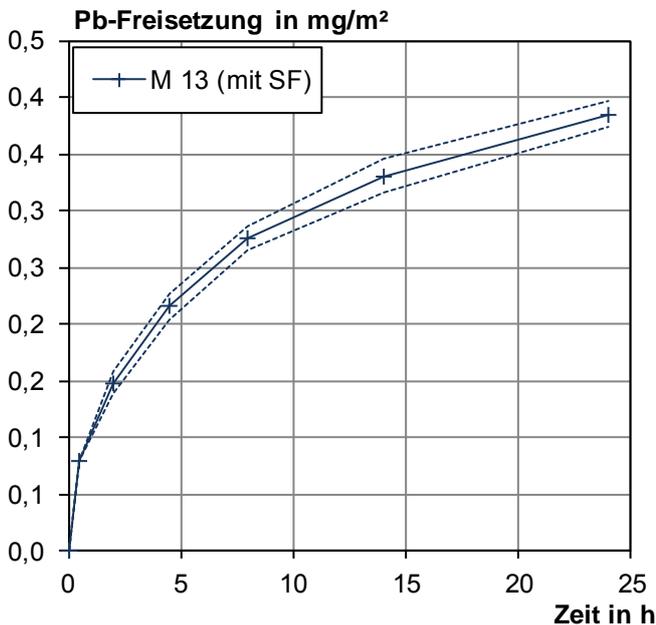
Bild 29 zeigt die kumulative Freisetzung über die gesamte Versuchslaufzeit. Der Anstieg der Freisetzung setzt sich bis zum Alter von 4 bis 8 d fort, anschließend geht die Auslaugung stark zurück, in den letzten zwei bis drei Elutionsschritten wird nur noch sehr wenig Barium freigesetzt. M 20 und M 13 zeigen die niedrigste Freisetzung.



**Bild 29:** Kumulative Freisetzung von Barium im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

## Blei

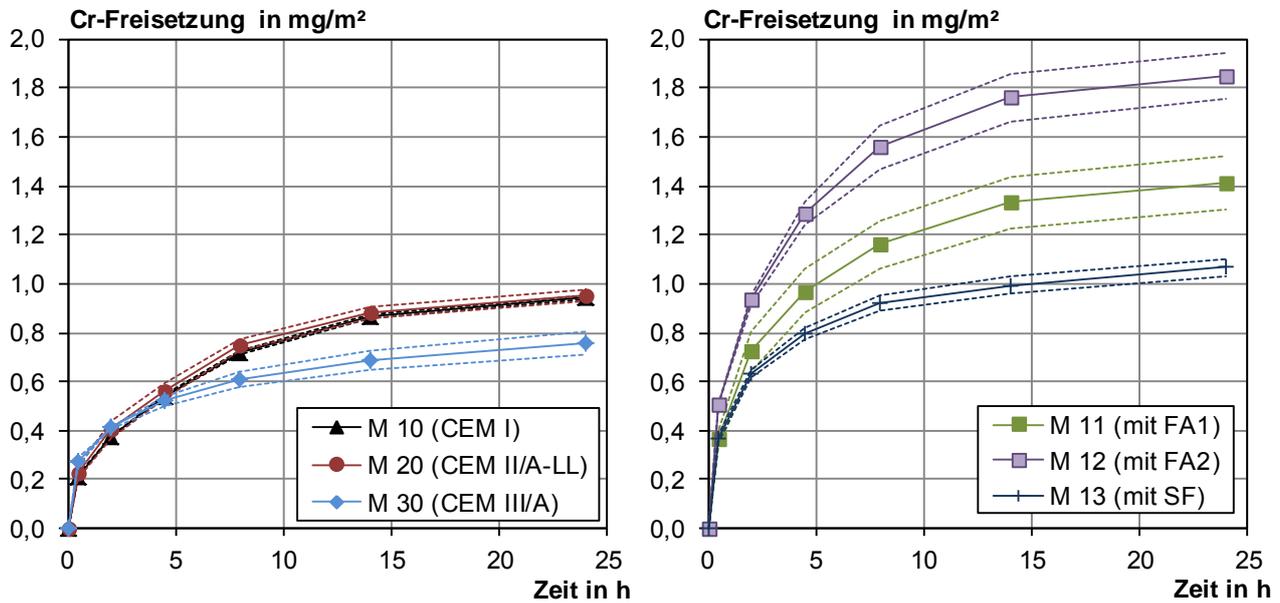
Die Bleifreisetzung wird nur für die silikastaubhaltige Mischung M 13 während der Frischbetonphase dargestellt (s. Bild 30). Bei allen anderen Mischungen waren die Bleikonzentrationen nicht nachweisbar (s. Tabellen 8 und 9). Die höchsten Gesamtgehalte zeigen die Bindemittelkombinationen mit Flugasche, insbesondere M 12. Das Blei liegt in der Flugasche offenbar nicht in leicht löslicher Form vor. Auch die Bleifreisetzung der Mischung M 13 ist sehr gering und im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit nicht relevant.



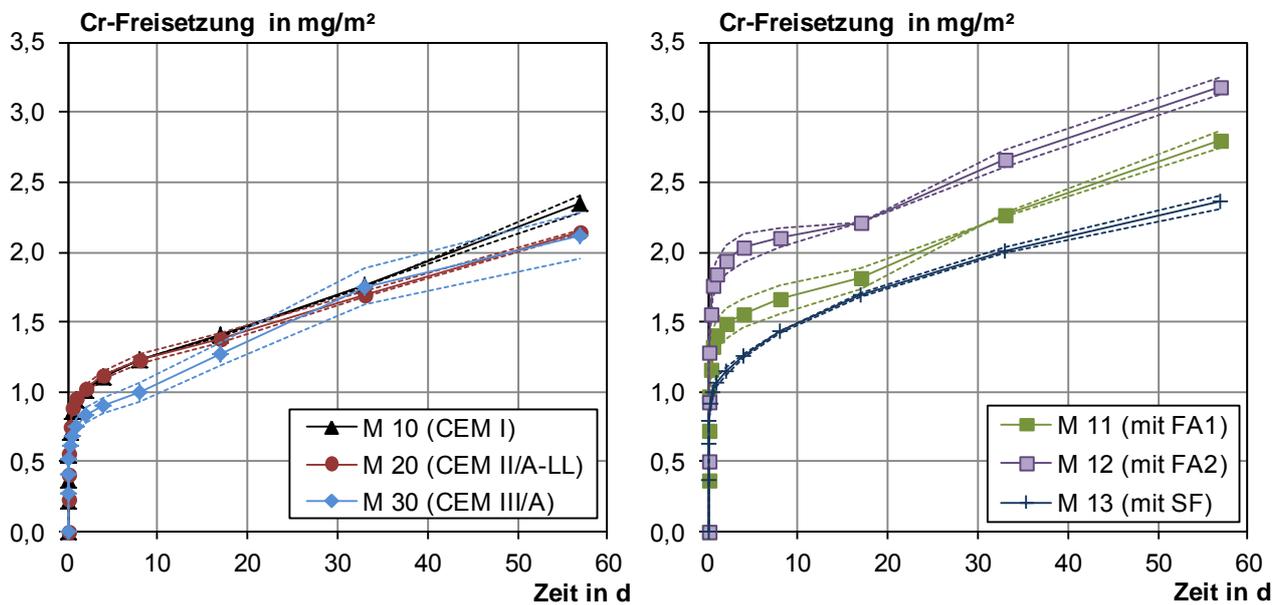
**Bild 30:** Kumulative Freisetzung von Blei im Frischbetonstandtest

## Chrom

Chrom gehört zu den Parametern, die fast durchgehend in gut messbaren Konzentrationen in den Eluaten vorlagen. Die Freisetzung ist in den Bildern 31 und 32 dargestellt. Im Frischbetonstandtest ist die Freisetzung in den ersten Elutionsschritten erhöht und geht in den letzten beiden Elutionsschritten des Frischbetonstandtests zurück (Bild 31). Auch chromatreduzierter Zement enthält einen Anteil leicht löslicher Chromverbindungen (z. B.  $K_2CrO_4$ ). In /Vol12/ ist dargelegt, dass zu Hydratationsbeginn knapp 5 % des Gesamtchroms gelöst vorliegen können. Daher sind die Konzentrationen in der flüssigen Phase des Zementleims zu Hydratationsbeginn relativ hoch und nehmen dann analog zu den Sulfatkonzentrationen ab. Wahrscheinlich erfolgt eine Einbindung in Ettringit /Vol12/. Beim anschließenden Langzeitstandtest wurden in den letzten drei Elutionsschritten zunehmende Konzentrationen gefunden. Die Freisetzung steigt dadurch zwischen 17 und 57 Tagen annähernd linear an (s. Bild 32). Bei den Randbedingungen des Versuchs ist im oberflächennahen Bereich mit einer Zersetzung von Ettringit zu rechnen. Dies zeigen auch die Sulfatfreisetzungen. Bei der Ettringitzersetzung kann Chromat wieder freigesetzt werden.



**Bild 31:** Kumulative Freisetzung von Chrom im Frischbetonstandtest



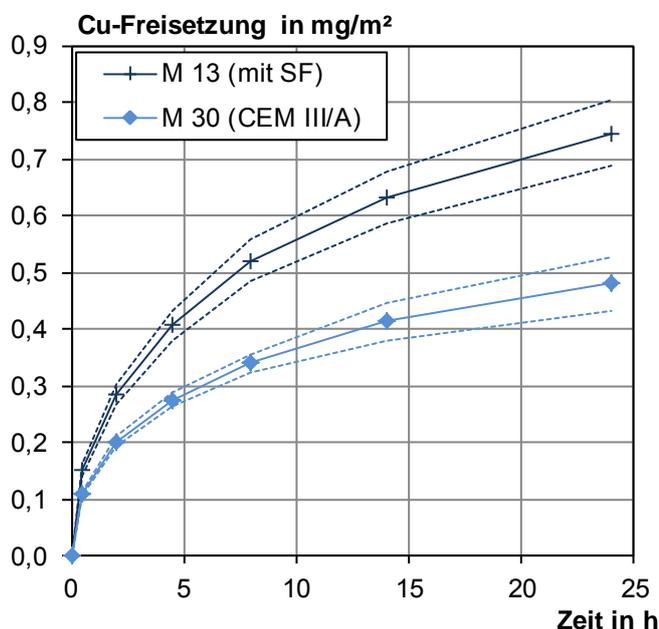
**Bild 32:** Kumulative Freisetzung von Chrom im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

Der Vergleich der verschiedenen Mischungen zeigt für die Betone ohne Zusatzstoffe sehr ähnliche Freisetzungen, wobei die Hochofenzementmischung in der Frischbetonphase etwas niedriger liegt als die anderen beiden Zemente. Der Einsatz von Silikastaub hatte auf die Chromfreisetzung keinen signifikanten Einfluss (Vergleich der Mischungen M 10 und M 13).

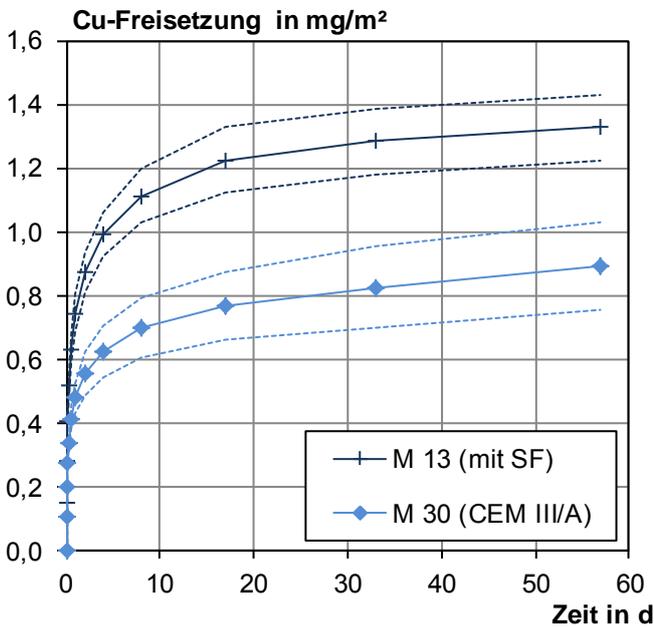
Die Verwendung von Flugasche erhöht die Freisetzung während der Frischbetonphase im Vergleich zu M 10 bei M 11 um Faktor 1,5 und bei M 12 um Faktor 2,0. Dies entspricht dem Verhältnis der Gesamtgehalte im Bindemittel (s. Bild 8). Während der Festbetonphase ist die Freisetzung bei den drei Mischungen gleich (Mittelwerte 1,3 bis 1,4 mg/m<sup>2</sup>).

## Kupfer

Die Kupferkonzentrationen waren während der Frischbetonphase sehr gering. Offenbar liegt dieses Element in den Ausgangsstoffen nur zu einem geringen Anteil in leicht löslicher Form vor und wird erst während der Hydratation freigesetzt. Auswertbar waren in der Frischbetonphase nur die Mischungen M 13 und M 30 (s. Bild 33). Diese Mischungen weisen im Vergleich zu den anderen eher geringe Gesamtgehalte auf. Der Gesamtgehalt scheint demnach nicht entscheidend zu sein. Für die beiden Mischungen wird in Bild 34 auch die Freisetzung über die gesamte Versuchslaufzeit dargestellt. Die Freisetzungen sind sehr gering, die höchste Konzentration lag bei 2,0 µg/l.

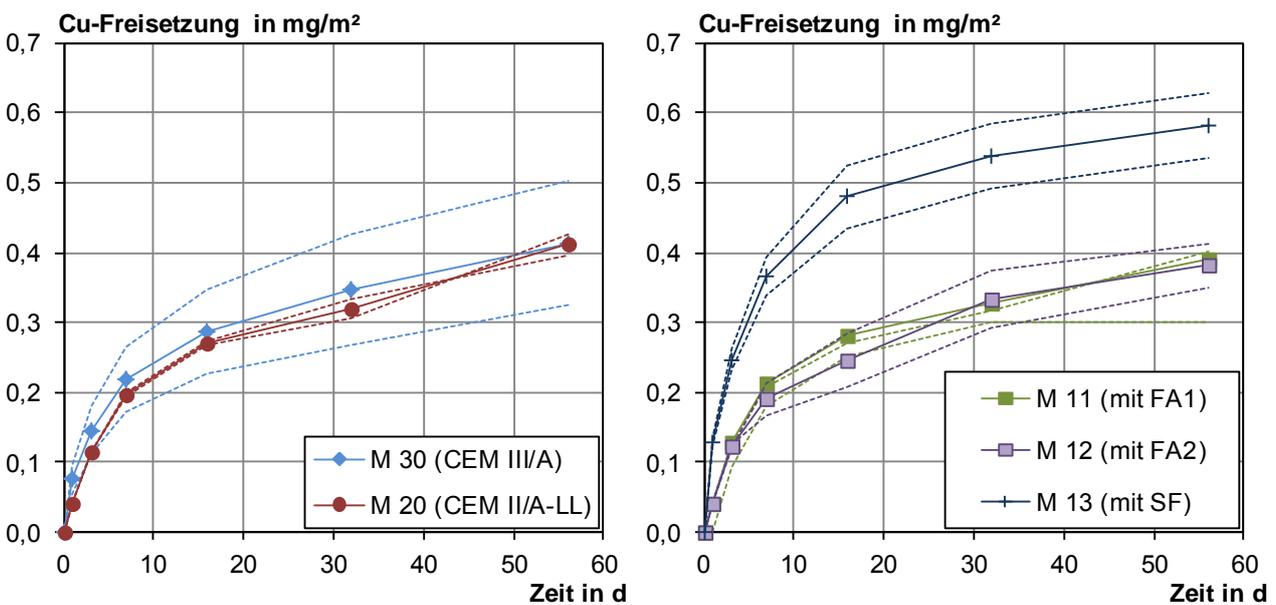


**Bild 33:** Kumulative Freisetzung von Kupfer im Frischbetonstandtest



**Bild 34:** Kumulative Freisetzung von Kupfer im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

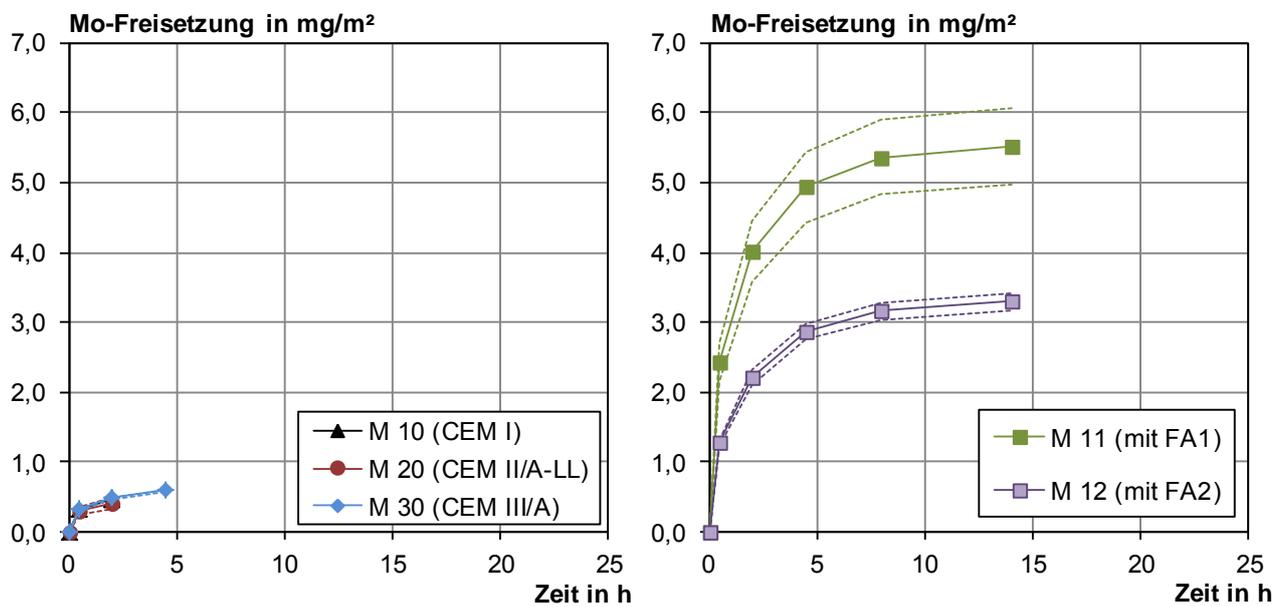
Für die Mischungen M 20, M 11 und M 12 waren die Konzentrationen im angeschlossenen Langzeitstandtest auswertbar. Bild 35 zeigt daher die Festbetonergebnisse im Vergleich. Auch hier sind die Freisetzungen sehr gering.



**Bild 35:** Kumulative Freisetzung von Kupfer im angeschlossenen Langzeitstandtest (Vernachlässigung der Freisetzung im Frischbetonstandtest)

## Molybdän

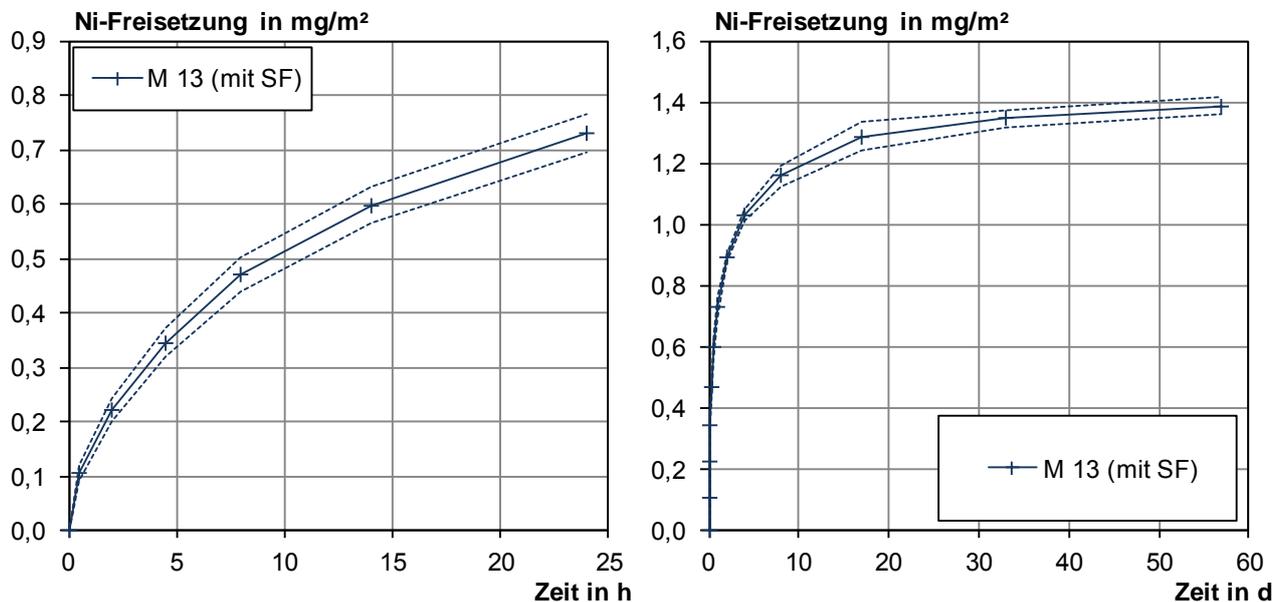
Molybdän wird nur während der Frischbetonphase freigesetzt. Bild 36 zeigt die Freisetzung für die auswertbaren Versuche für die relevanten Elutionschritte. Die drei Zemente zeigen eine sehr ähnliche und vernachlässigbar geringe Freisetzung. Die Flugaschen erhöhen den Molybdängehalt im Bindemittel im Vergleich zu M 10 um Faktor 28 (FA1) bzw. 24 (FA2) (vgl. Bild 8). Die messbare Freisetzung erhöht sich dadurch um Faktor 12 (FA1) bzw. 7 (FA2). Trotz der Erhöhung sind die Freisetzungen in Anbetracht der vergleichsweise geringen Toxizität dieses Schwermetalls nicht problematisch. Wie in /Vol12/ dargestellt, wird Molybdän im Verlauf der Hydratation eingebunden, so dass die Porenlösungskonzentration analog zu Sulfat drastisch abfällt. Wahrscheinlich ist ein Einbau von Molybdät in Ettringit, wie er analog auch für Chromat vermutet wird. Anders als bei Chrom ergibt sich jedoch für Molybdän kein Anstieg der Konzentrationen im späteren Verlauf des Versuchs. Die Einbindung von Molybdän scheint dauerhafter zu sein. Möglicherweise wird es bei einer Zersetzung von Ettringit in Monosulfat gebunden.



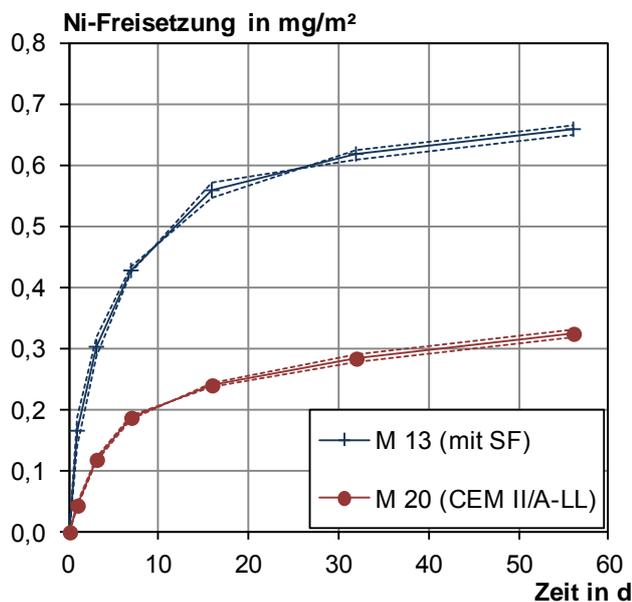
**Bild 36:** Kumulative Freisetzung von Molybdän im Frischbetonstandtest

## Nickel

Die Nickelkonzentrationen waren nur für die Mischung M 13 über den gesamten Versuchszeitraum auswertbar (s. Bild 37). Die höchste Konzentration lag bei 2,35 µg/l. Für den Beton M 20 konnte während der Festbetonphase die Freisetzung quantifiziert werden. Sie ist in Bild 38 dargestellt. Die Nickelfreisetzungen sind sehr gering und nehmen im Verlauf des Versuchs ab.



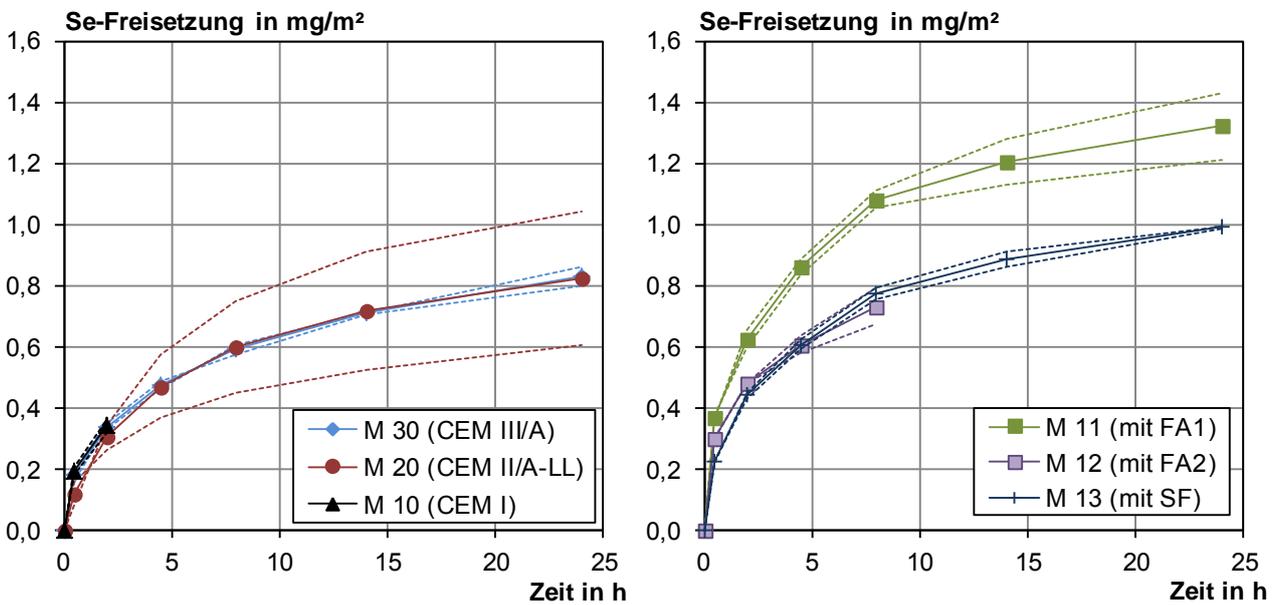
**Bild 37:** Kumulative Freisetzung von Nickel aus dem Beton M 13 im Frischbetonstandtest (links) und im gesamten Versuchszeitraum (rechts)



**Bild 38:** Kumulative Freisetzung von Nickel im angeschlossenen Langzeitstandtest (Vernachlässigung der Freisetzung im Frischbetonstandtest)

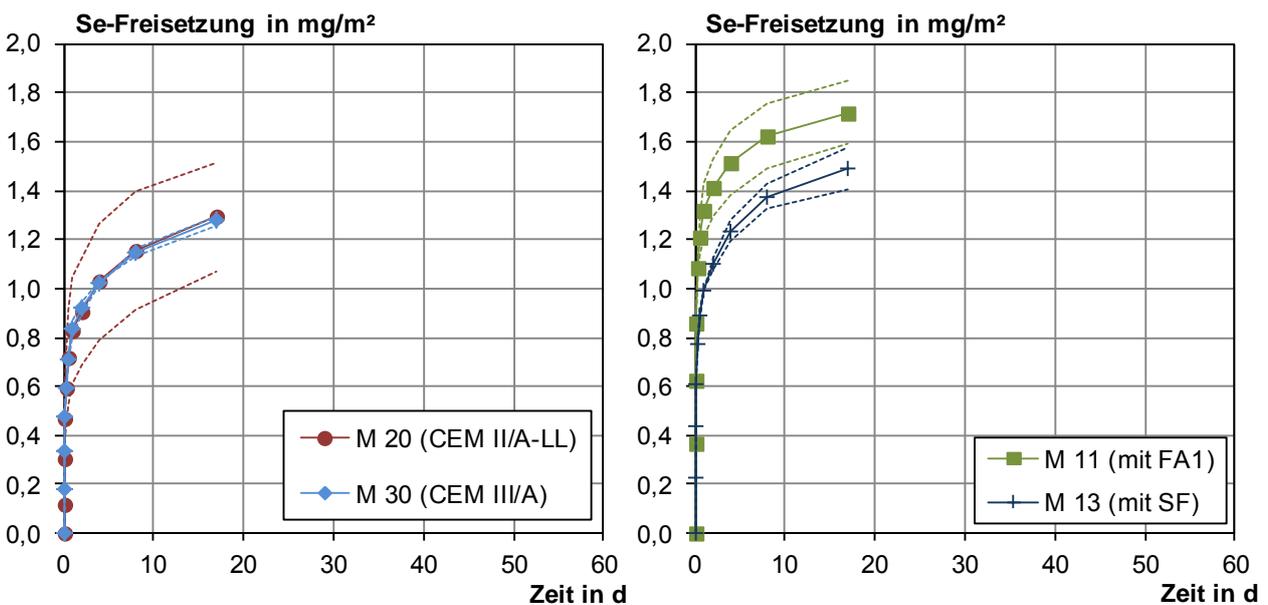
## Selen

Die Selenkonzentrationen im Frischbetonstandtest wurden für alle Mischungen ausgewertet, allerdings z. T. nur die ersten Elutionsschritte, weil die Konzentrationen zu den späteren Zeitpunkten durchgehend unter der Bestimmungsgrenze lagen. Die Betone ohne Betonzusatzstoffe zeigen die gleichen Freisetzungen (s. Bild 39, links). Durch die Verwendung von Silikastaub bzw. von Flugasche FA2 wird die Freisetzung marginal erhöht, bei der Flugasche FA1 ist der Anstieg etwas höher.



**Bild 39:** Kumulative Freisetzung von Selen im Frischbetonstandtest

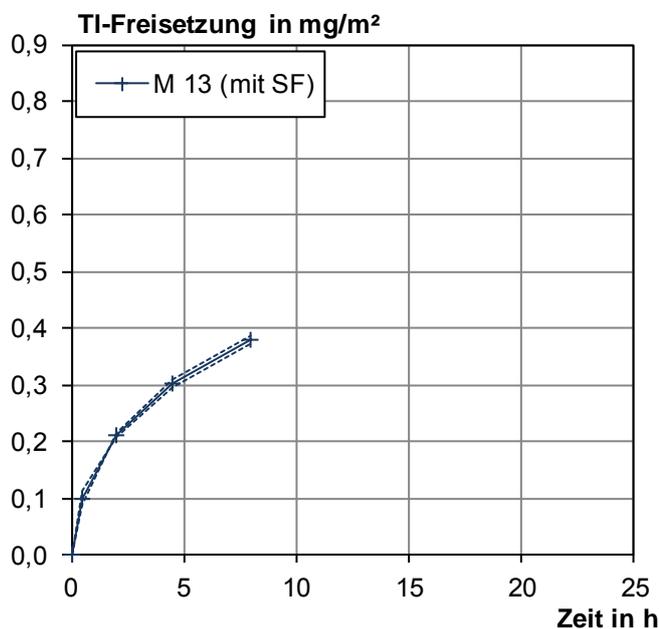
Die Auslaugung aus während der Festbetonphase wurde für die Mischungen M 20, M 30, M 11 und M 13 ausgewertet, allerdings nur bis zum Alter von 17 d, da in den letzten beiden Elutionsschritten die Konzentrationen i. d. R. unter der Bestimmungsgrenze lagen (Bild 40). Die Freisetzungen liegen bei allen Mischungen auf einem sehr niedrigen Niveau.



**Bild 40:** Kumulative Freisetzung von Selen im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

## Thallium

Bei Thallium lag die Bestimmungsgrenze bei 1 µg/l. Diese Genauigkeit ist angesichts der hohen Toxizität dieses Stoffes (GFS 0,8 µg/l) nicht ausreichend, mit der ICP-OES war jedoch keine genauere Analyse möglich. Die Konzentrationen lagen fast durchgehend unter der Bestimmungsgrenze, lediglich in den ersten drei Eluaten des Betons M 13 konnte Thallium bestimmt werden. Die Freisetzung ist in Bild 41 dargestellt.

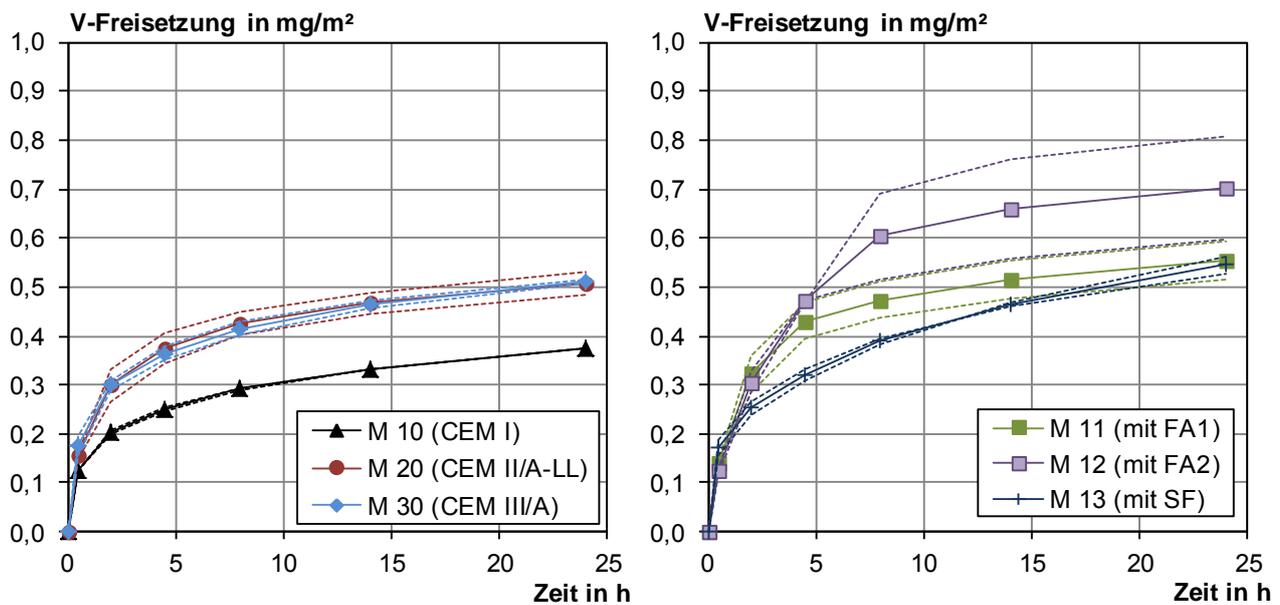


**Bild 41:** Kumulative Freisetzung von Thallium im Frischbetonstandtest

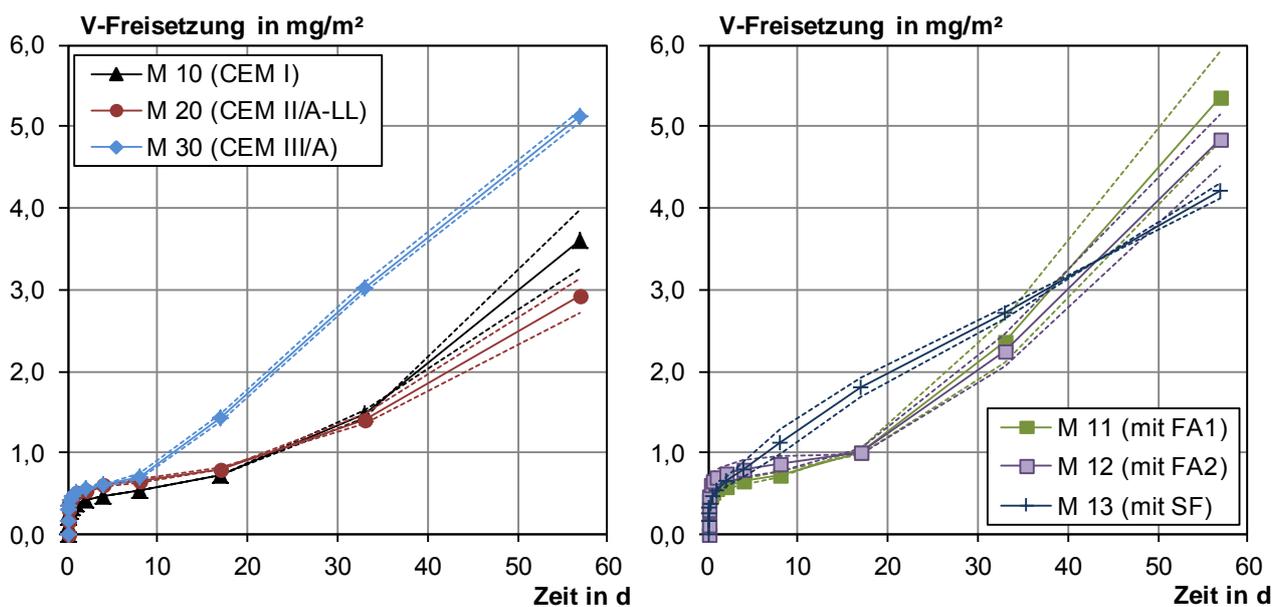
## Vanadium

Die Vanadiumkonzentrationen waren in fast allen Eluaten nachweisbar und wurden für alle Mischungen ausgewertet (s. Bilder 42 und 43). Vanadium wird in erster Linie während der Festbetonphase freigesetzt, insbesondere in den letzten zwei bis drei Elutionsschritten. Beim letzten Elutionsschritt (57 d) waren die Eluatkonzentrationen durchgehend sehr hoch, der Maximalwert wurde für M 11, Probe a, gemessen und lag bei 41 µg/l. Der Anstieg ist damit deutlich stärker als bei Chrom und Sulfat. Aufgrund der zeitlichen Entwicklung der Auslaugung wäre bei zukünftigen Forschungsprojekten eine längere Versuchsdauer sinnvoll.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Betone zeigt, dass die Flugaschen und Hüttensand die Vanadiumfreisetzung tendenziell erhöhen. Bei den flugaschaltigen Betonen ist der Vanadiumgehalt im Bindemittel höher als bei der Referenz M 10, bei M 30 liegen der Gesamtgehalt im Bindemittel jedoch niedriger. Die Freisetzung wird wahrscheinlich primär vom pH-Wert bestimmt. Hierauf wird in Abschnitt 4.2.4.2 eingegangen.



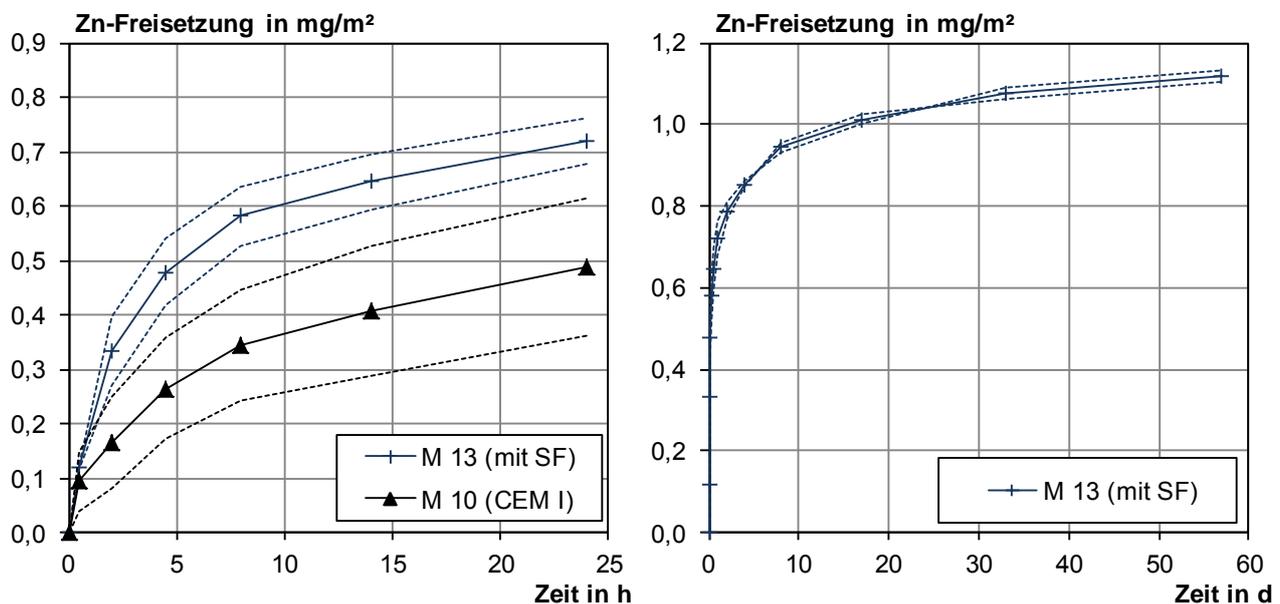
**Bild 42:** Kumulative Freisetzung von Vanadium im Frischbetonstandtest



**Bild 43:** Kumulative Freisetzung von Vanadium im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest

## Zink

Die Zink-Konzentrationen wurden in Abschnitt 4.2.1.2 bei fast allen Betonen als nicht auswertbar eingestuft (s. Tabellen 8 und 9). Lediglich M 13 kann über den gesamten Versuchszeitraum ausgewertet werden (s. Bild 44, rechts). Während der Frischbetonphase konnte auch M 10 ausgewertet werden (s. Bild 44, links). Die Freisetzungen sind gering und der Freisetzungsverlauf weist keine Besonderheiten auf.



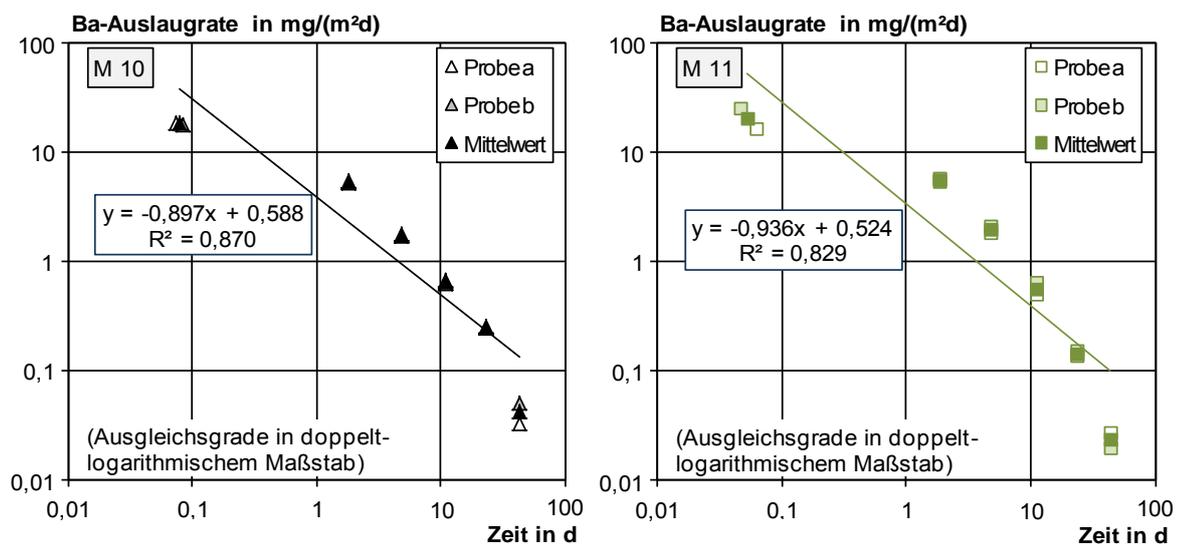
**Bild 44:** Kumulative Freisetzung von im Frischbetonstandtest (links) und im gesamten Versuchszeitraum (rechts)

### 4.2.4.2 Kinetik der Auslaugung aus Festbeton

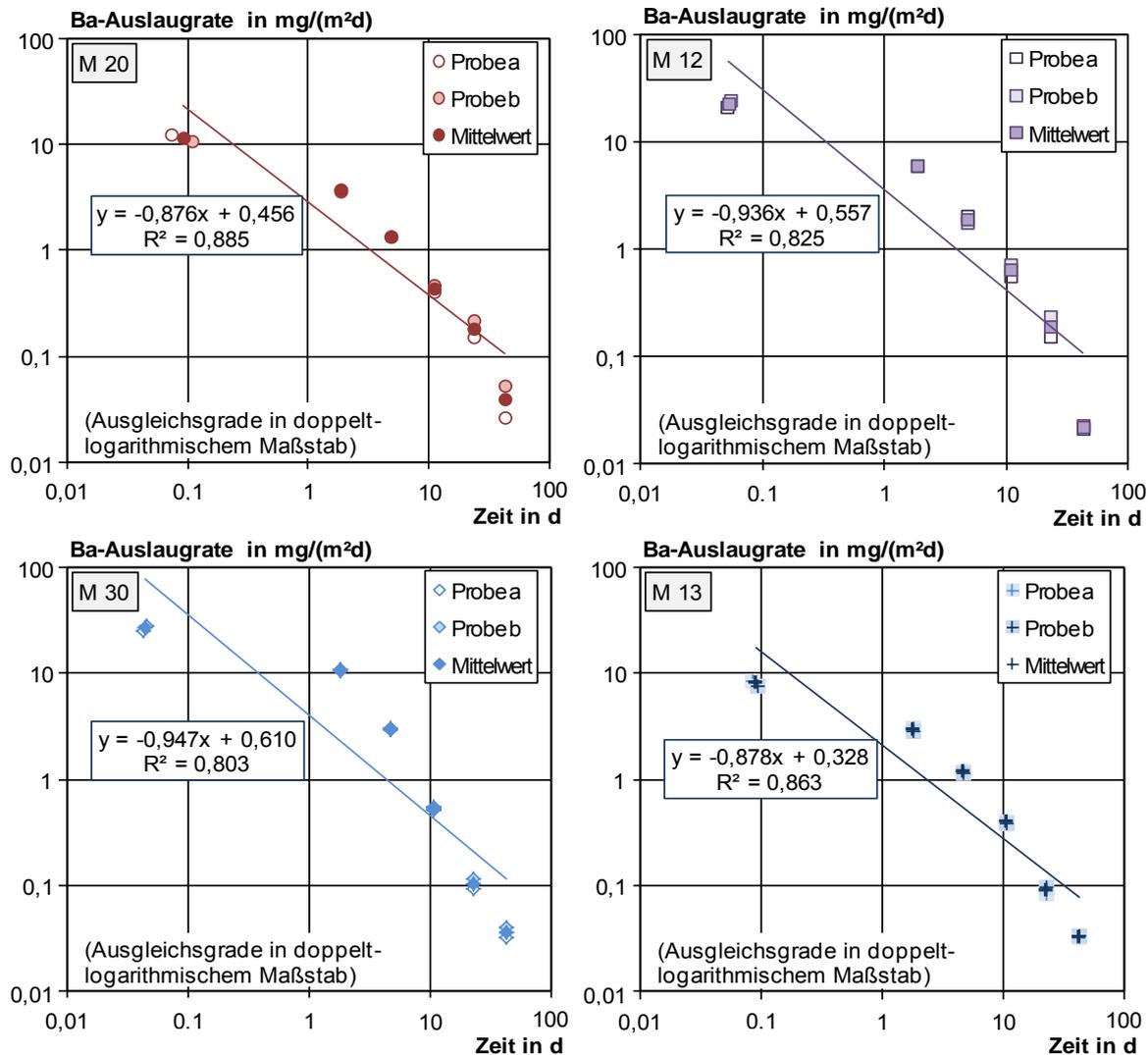
Die Auslaugraten wurden für die Festbetonphase gemäß Abschnitt 3.1.2 berechnet und sind in den folgenden Bildern im doppeltlogarithmischen Maßstab über der Zeit aufgetragen (lgJ-Igt Diagramme). Ausgewertet wurden die in Tabelle 9 angegebenen Versuchsreihen, auf eine Darstellung von Antimon und Selen wurde allerdings verzichtet, da in mehreren Elutionsschritten keine messbaren Konzentrationen vorlagen und die Auslaugkinetik daher nicht zuverlässig beschrieben werden kann.

## Barium

Für Barium wurde der Verlauf der Auslaugrate durch eine Gerade approximiert und die Auswertung gemäß Abschnitt 3.1.2 durchgeführt. Die ermittelten Steigungen betragen ca. -0,9 (s. Bilder 45 und 46). Die Geraden beschreiben das Auslaugverhalten allerdings nur ungenügend. Bei der Diskussion der Bariumfreisetzung in Abschnitt 4.2.4.1 wurde bereits darauf hingewiesen, dass Bariumsulfat für diesen Parameter die maßgebliche einbindende Phase darstellt. Aufgrund der Ettringitzerersetzung im oberflächennahen Bereich des Zementsteins steigt wahrscheinlich die Sulfatkonzentrationen der Porenlösung an und die Bariumkonzentration sinkt. Dies führt dazu, dass mehr Sulfat- und weniger Bariumionen aus dem Beton ausdiffundieren.



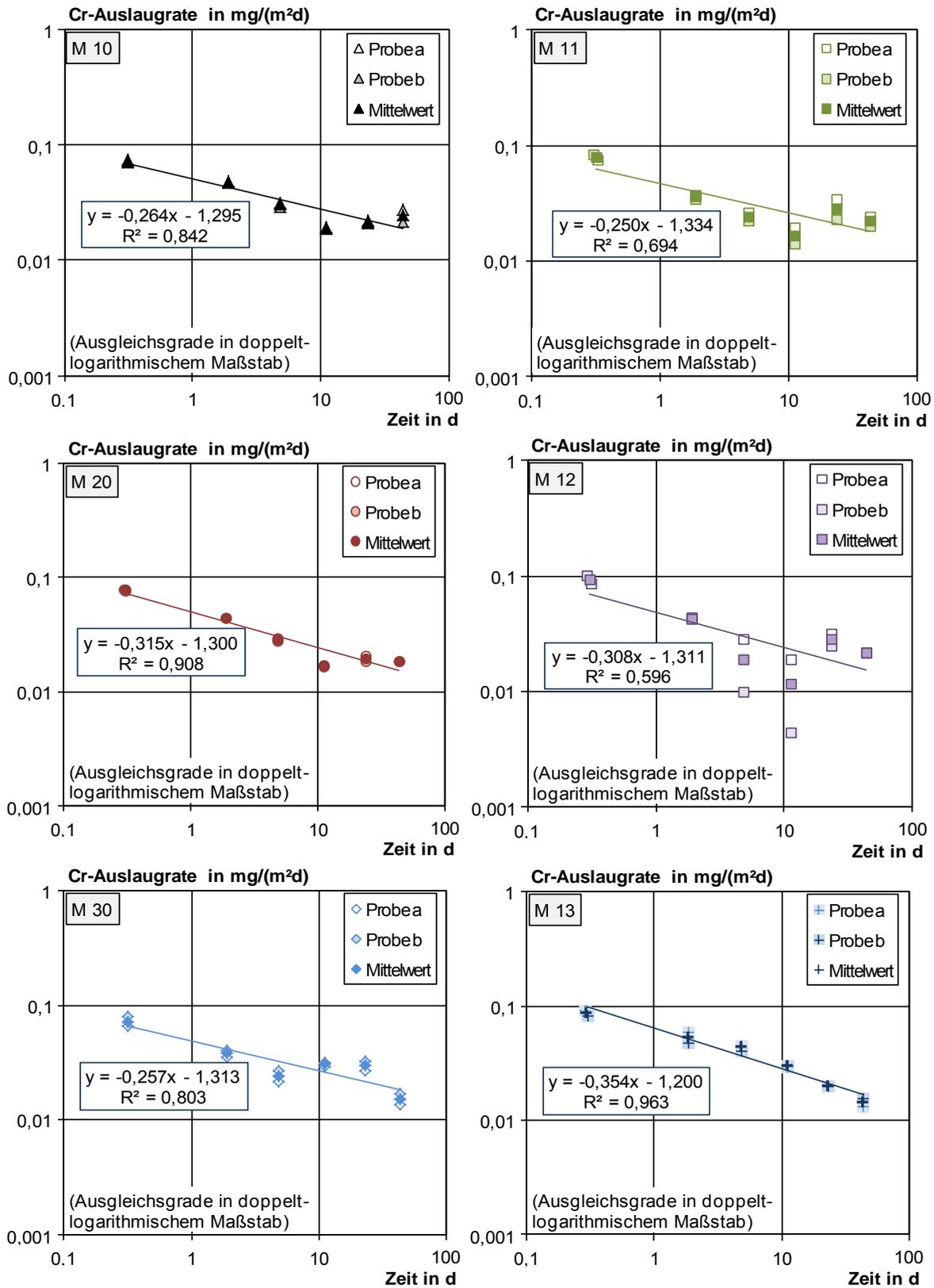
**Bild 45:** Bariumauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest – Betone M 10 und M 11



**Bild 46:** Bariumauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest – Betone M 20, M 12, M30 und M 13

## Chrom

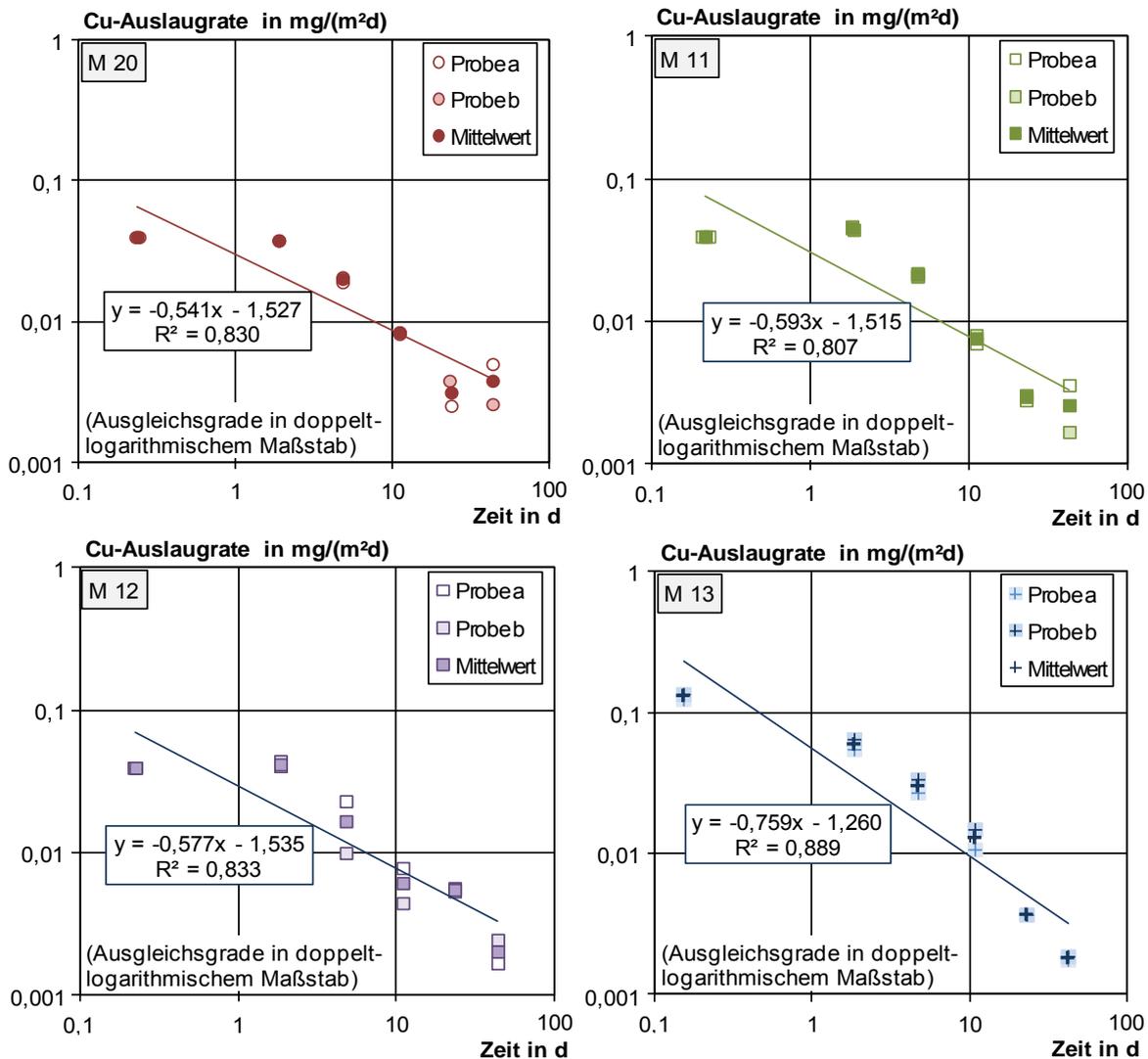
Die IgJ-Igt-Diagramme von Chrom sind in Bild 47 zusammengestellt. Bei einer Einbindung in Ettringit könnte man für Chrom ähnliche Verläufe wie für Sulfat erwarten. Der bei Sulfat festgestellte Anstieg der Auslaugrate im letzten Elutionsschritt ist bei Chrom allerdings wesentlich schwächer ausgeprägt. Dies kann daran liegen, dass Chromat in andere Sulfatphasen (z. B. Monosulfat) eingebaut wird, oder zusätzlich dreiwertiges Chrom in anderen Zementsteinphasen vorliegt. Eine diffusionskontrollierte Freisetzung ist für Chrom nicht gegeben, wie die Steigungen der Ausgleichsgeraden zeigen.



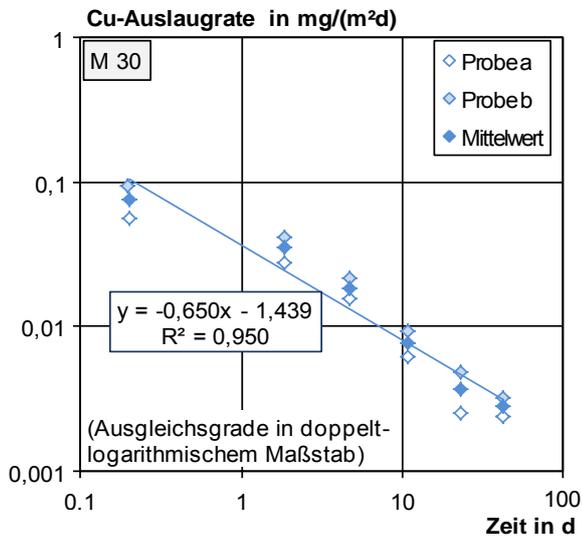
**Bild 47:** Chromauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest

## Kupfer

Die Kupferauslaugraten für die relevanten Betone sind in den Bildern 48 und 49 dargestellt. Die Auslaugrate im ersten Elutionsschritt des Langzeitstandtests weicht häufig von der Ausgleichsgeraden ab. Im weiteren Verlauf sinkt die lgJ steiler als -0,5 ab, vermutlich sinkt der Diffusionskoeffizient im Verlauf des Versuchs.



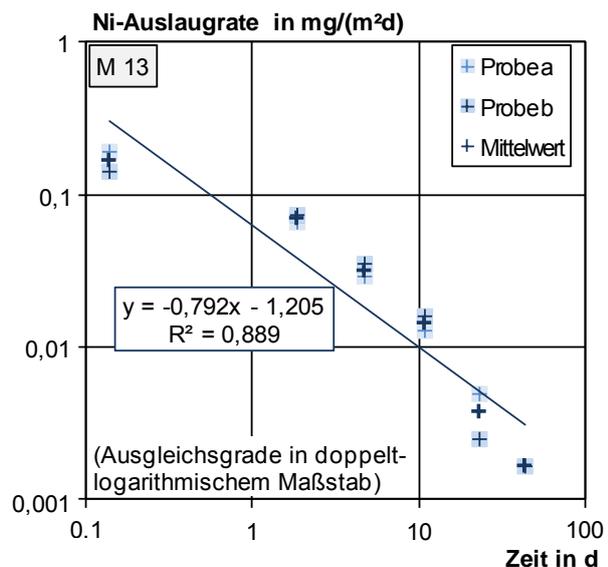
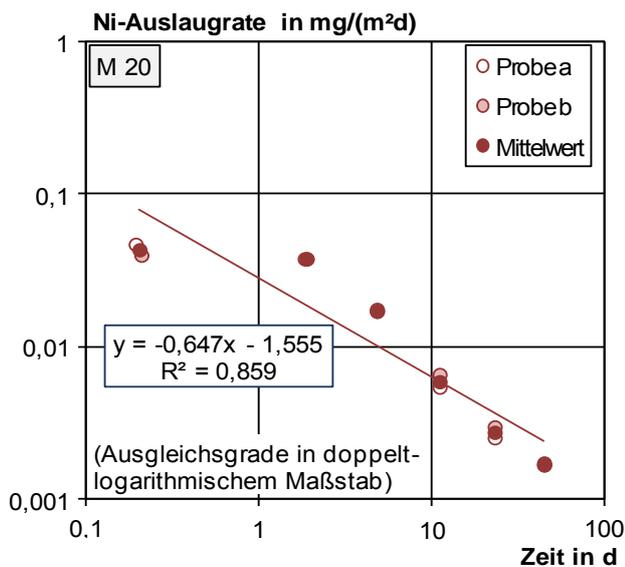
**Bild 48:** Kupferauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest – Betone M 2, M 11, M 12 und M 13



**Bild 49:** Kupferauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest – Beton M 30

**Nickel**

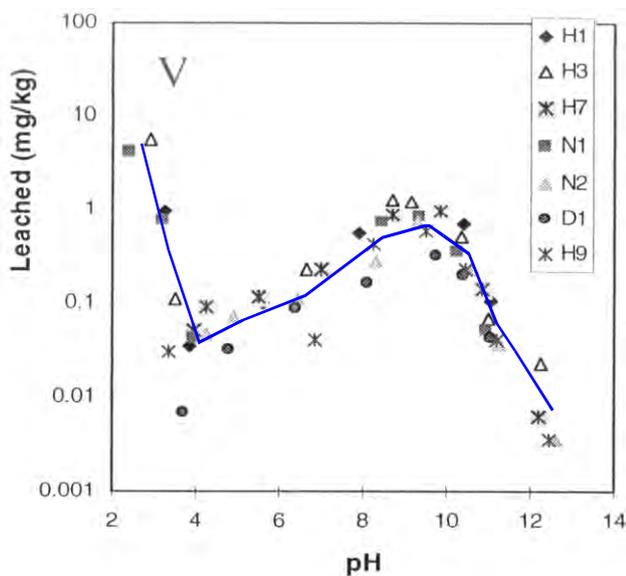
Die Auslaugraten von Nickel wurden nur für M 20 und M 11 ermittelt. Sie sind im Bild 50 dargestellt. Die Verläufe weisen große Ähnlichkeit mit Kupfer auf, auch hier nimmt vermutlich der Diffusionskoeffizient im Verlauf des Versuchs ab.



**Bild 50:** Kupferauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest

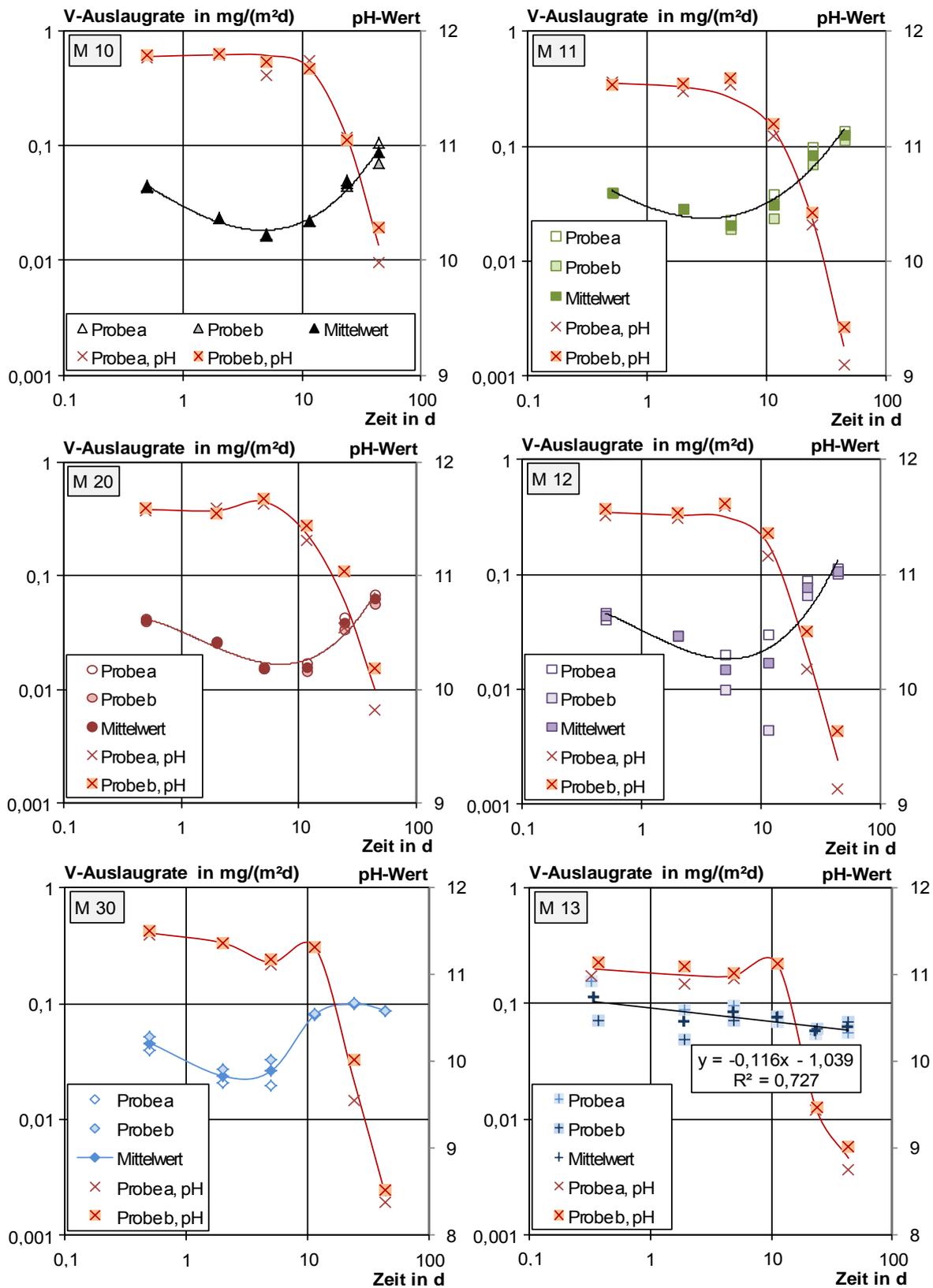
## Vanadium

Der Verlauf der Auslaugrate von Vanadium kann im doppeltlogarithmischen Maßstab nicht durch eine Gerade beschrieben werden. Das Auslaugverhalten von Vanadium ist sehr stark pH-Wert abhängig, wie die in Bild 51 dargestellten Ergebnisse aus der Literatur belegen. Die pH-Werte in den Eluaten liegen bei Beginn des angeschlossenen Langzeitstandtests bei bis zu 11,8 und in den letzten Eluaten z. T. nur noch bei 8,5. Im Bild 52 sind die pH-Werte auf der Sekundärachse dargestellt.



**Bild 51:** Ergebnisse aus  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Versuchen an gebrochenem Mörtel für Vanadium, /Slo01/

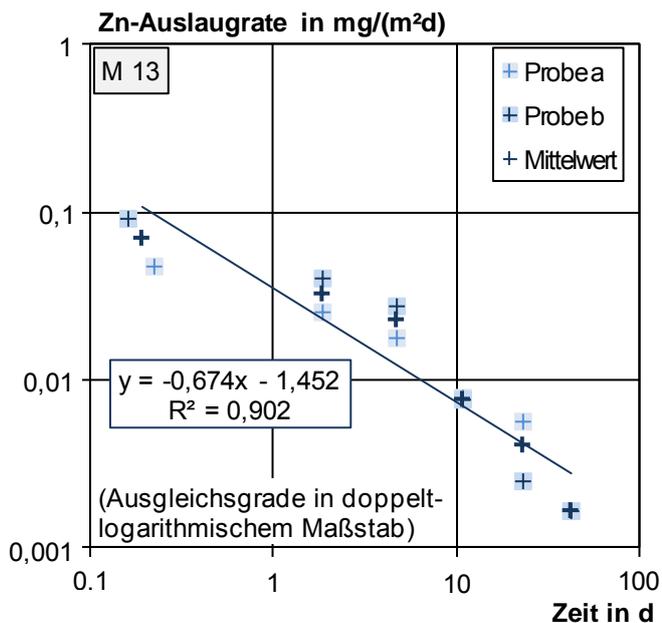
Bei den Mischungen M 10, M 11, M 12 und M 20 steigt mit der Abnahme des pH-Werts im Eluat an, wie es auf Basis der Ergebnisse aus Bild 51 zu erwarten war. Der Beton M 30 zeigt in den letzten Elutionsschritt keine weitere Zunahme der Auslaugrate. Hier ist der pH-Wert bereits unter 8,5 gesunken, d. h. die Löslichkeit von Vanadium nimmt wieder ab (s. Bild 51). Dieser Trend zeigt sich auch im Auslaugversuch. Die Mischung M 13 zeigt bereits in den ersten Eluaten pH-Werte von etwa 11 und dadurch höhere Vanadiumauslaugraten als die anderen Betone.



**Bild 52:** Vanadiumauslaugrate im angeschlossenen Langzeitstandtest

## Zink

Bei Zink ist nur die Auslaugrate von M 13 auszuwerten. Sie ist in Bild 53 dargestellt. Wie bei Kupfer und Nickel geht die Auslaugrate steiler als -0,5 zurück.



**Bild 53:** doppellogarithmische Darstellung des Verhaltens von Zink-Freisetzungsrate über der Zeit

## 4.3 Langzeitstandtest nach DAfStb-Richtlinie

### 4.3.1 Allgemeines

Die Mischungen M 10 (Z1), M 30 (Z3) und M 11 (Z1FA1) wurden für weitere Untersuchung mit DAfStb-Langzeitstandtest und dynamischem Versuch ausgewählt. Da die Konzentrationen aller Eluate an Cyanid, Fluorid, Arsen, Cadmium und Quecksilber in den vorangegangenen Untersuchungen nicht quantitativ bestimmt werden konnten, wurden diese Parameter beim DAfStb-Langzeitstandtest nicht analysiert.

## **4.3.2 Ergebniszusammenstellung**

### **4.3.2.1 Blindwerte**

Die Blindproben wurden vor jedem Wasserwechsel entnommen. Die pH-Werte in den Blindproben lagen zwischen 5,95 und 6,87 (Mittelwert: 6,2), das Redoxpotential betrug 402 bis 537 mV (Mittelwert: 465 mV) und die elektrische Leitfähigkeit lag bei 1,61 bis 5,04  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Mittelwert: 3,44  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Es wurden alle stofflichen Parameter des DAfStb-Langzeitstandtests in den 6 Blindproben analysiert. Dabei lagen Natrium, Kalium und Chlorid durchgehend unter der Nachweisgrenze (0,1 mg/l). Für Sulfat wurde in einem Eluat ein Blindwert von 0,23 mg/l gefunden. Für Antimon, Barium, Molybdän, Nickel, Thallium und Zink wurde eine Bestimmungsgrenze von 1  $\mu\text{g}/\text{l}$  benannt, die in allen Eluaten unterschritten wurde. Für Blei, Chrom, Kobalt und Vanadium betrug die Nachweisgrenze 0,5  $\mu\text{g}/\text{l}$ , hier waren ebenfalls alle Konzentrationen nicht nachweisbar. Lediglich bei Selen und Kupfer wurde die Nachweisgrenze in je einem Eluat überschritten (Cu: 0,77  $\mu\text{g}/\text{l}$ , Se: 0,53  $\mu\text{g}/\text{l}$ ).

### **4.3.2.2 Eluatwerte**

Die Konzentrationen der Eluate sind im Anhang in den Tabellen A19 bis A21 zusammengestellt. Analog zum Vorgehen bei der Auswertung der Frischbetonstandtests mit anschließendem Langzeitstandtest wurden die Analyseergebnisse der Spurenelemente und Barium dahingehend geprüft, ob eine Auswertung des Freisetzungsverlaufs sinnvoll ist (s. Tabelle 10).

Für alle Versuchsreihen wurde die kumulative Freisetzung nach 56 Tagen berechnet. Für Stoffe, die in einem Teil der Eluate nachgewiesen wurden, ist neben der maximalen Freisetzung, die sich ergibt, wenn die nicht messbaren Eluatkonzentrationen auf die Bestimmungsbzw. Nachweisgrenzen gesetzt werden, auch die minimale Freisetzung angegeben, bei der die nicht nachweisbaren Konzentrationen zu Null gesetzt werden. Die Ergebnisse sind im Anhang in Tabelle A22 enthalten.

**Tabelle 10:** Beurteilung der Eluatkonzentrationen im DAFStb-Langzeitstandtest hinsichtlich einer Auswertung des Freisetzungsverlaufs (Doppelbestimmung)

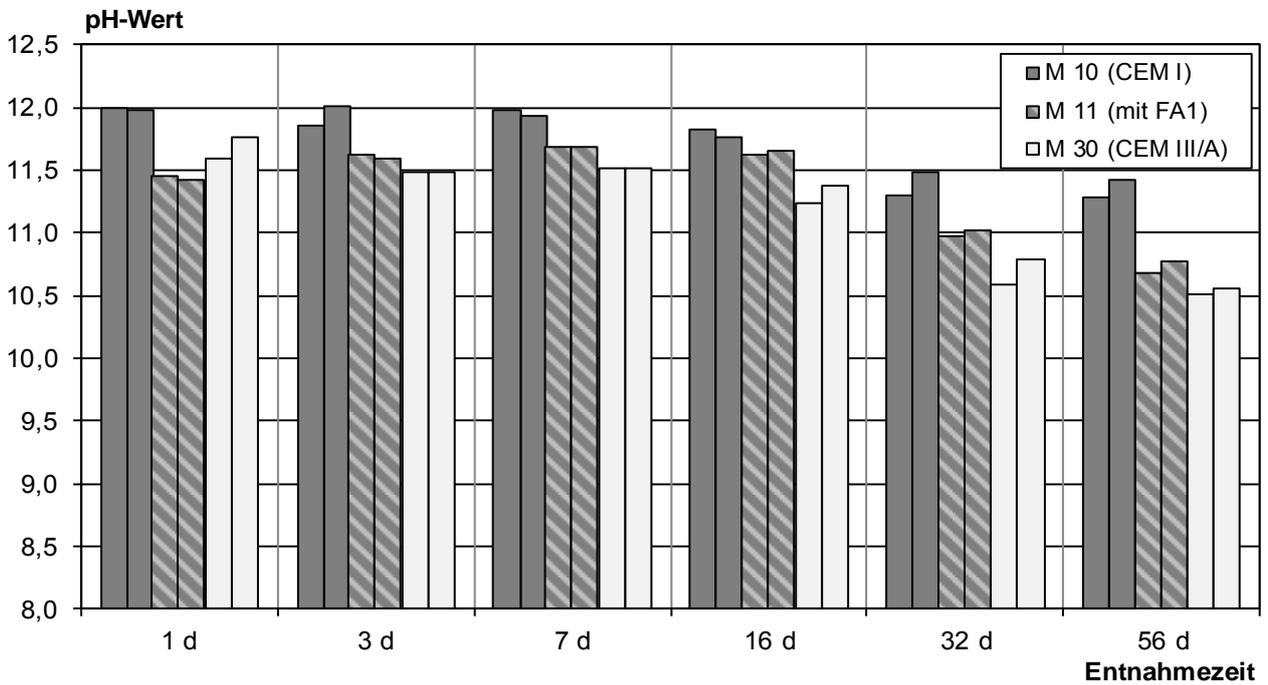
Parameter	Konzentrationsbereich	Anzahl der Messwerte bei Beton (Gesamtanzahl jeweils 12)			Auswertung
		M 10	M 30	M 11	
1	2	3	5	6	9
Sb	< 1 µg/l	12	12	9	entfällt
	≥ 1 µg/l	0	0	3	
Ba	< 1 µg/l	0	0	0	alle Betone
	≥ 1 µg/l	12	12	12	
Pb	< 0,5 µg/l	5	0	0	M 30, M 11
	0,5 - < 1 µg/l	4	1	4	
	≥ 1 µg/l	3	11	8	
Cr	< 0,5 µg/l	5	6	2	alle Betone <sup>1)</sup>
	0,5 - < 1 µg/l	7	6	5	
	≥ 1 µg/l	0	0	5	
Co	≤ 0,5 µg/l	1	4	4	alle Betone
	0,5 - < 1 µg/l	9	8	8	
	≥ 1 µg/l	2	0	0	
Cu	< 0,5 µg/l	7	8	8	entfällt
	0,5 - < 1 µg/l	4	4	4	
	≥ 1 µg/l	1	0	0	
Mo	< 1 µg/l	12	12	12	entfällt
Ni	< 1 µg/l	12	12	12	entfällt
Se	< 0,5 µg/l	7	2	2	M 30, M 11
	0,5 - < 1 µg/l	4	3	8	
	≥ 1 µg/l	1	7	2	
Tl	< 1 µg/l	12	12	12	entfällt
V	< 0,5 µg/l	6	0	2	alle Betone
	0,5 - < 1 µg/l	0	2	2	
	≥ 1 µg/l	6	10	8	
Zn	< 1 µg/l	11	6	11	entfällt
	≥ 1 µg/l	1	6	1	

1) In der Regel werden in den ersten beiden Elutionsschritten keine messbaren Konzentrationen festgestellt. Dies wurde bei der Auswertung berücksichtigt

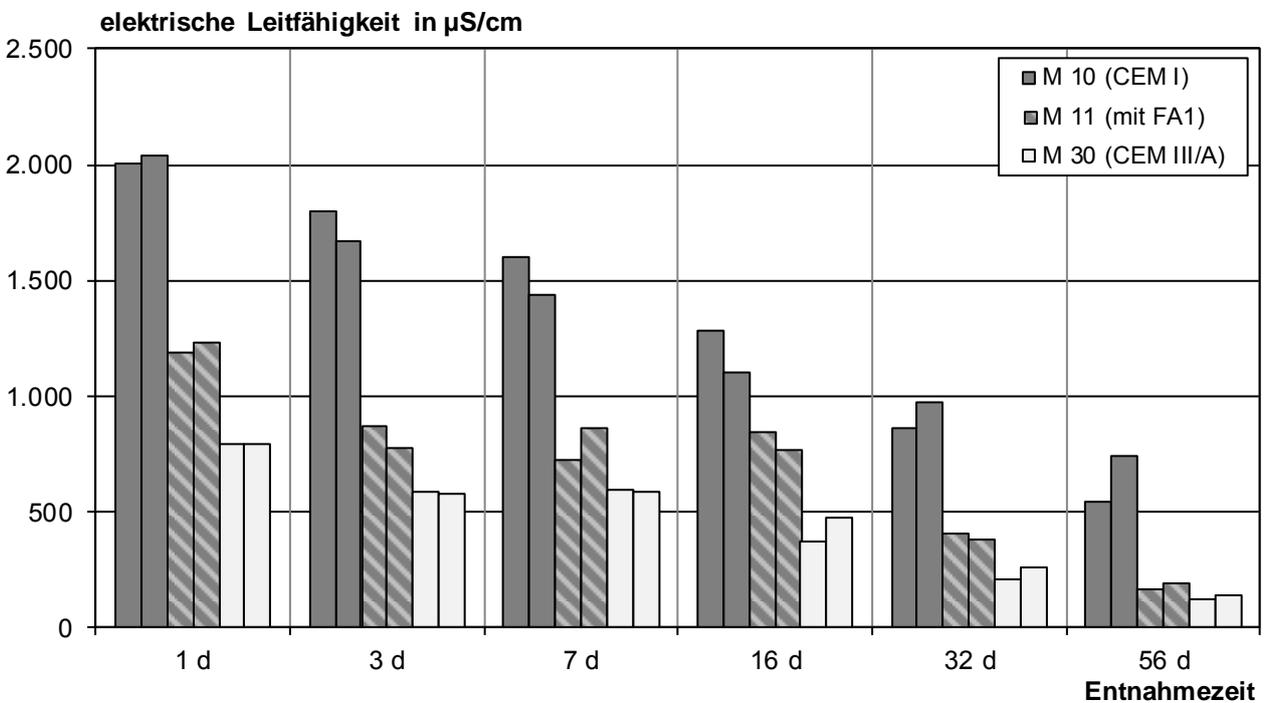
### 4.3.3 pH-Wert, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit

Im Bild 54 sind die pH-Werte der drei Doppelbestimmungen dargestellt. Wie beim angeschlossenen Langzeitstandtest aus Abschnitt 4.2 werden auch hier für den Beton aus Portlandzement die höchsten pH-Werte gemessen. Vergleicht man die beiden Langzeitstandtests (Bilder 9 und 54), so ist festzustellen, dass im DAfStb-Langzeitstandtest höhere pH-Werte auftreten als im Langzeitstandtest nach der Frischbetonauslaugung. In den ersten vier Elutionsschritten ist die Differenz relativ gering (0,17 gemittelt über alle Einzelversuche). In den letzten beiden Elutionsschritten war beim angeschlossenen Langzeitstandtest jedoch eine drastische Abnahme des pH-Werts zu beobachten, die hier in wesentlich geringerem Umfang auftritt. Mit abnehmendem Klinkergehalt im Bindemittel steigt die Diskrepanz zwischen den beiden Langzeitstandtests an. Die pH-Werte des letzten Eluats des Portlandzementbetons lagen im DAfStb-Langzeitstandtest um 1,2 höher als im angeschlossenen Langzeitstandtest, beim Flugaschebeton betrug die Differenz 1,5 und beim Hochofenzement 2,1. Die Differenzen bei den pH-Werten sind insofern von Bedeutung als beim angeschlossenen Langzeitstandtest die Stabilitätsgrenze von Ettringit bei allen Betonen unterschritten wurde, was zu einem Anstieg der Sulfatfreisetzung geführt hat. Im DAfStb-Langzeitstandtest ist dagegen zumindest für den Portlandzementbeton keine Zersetzung von Ettringit zu erwarten. Da die Stabilitätsgrenze zwischen 9 und 10,8 liegt (s. /Sta01/) könnte bei den anderen beiden Betonen könnte auch in diesem Versuch eine, vermutlich auf einen oberflächennahen Bereich beschränkte, Zersetzung auftreten.

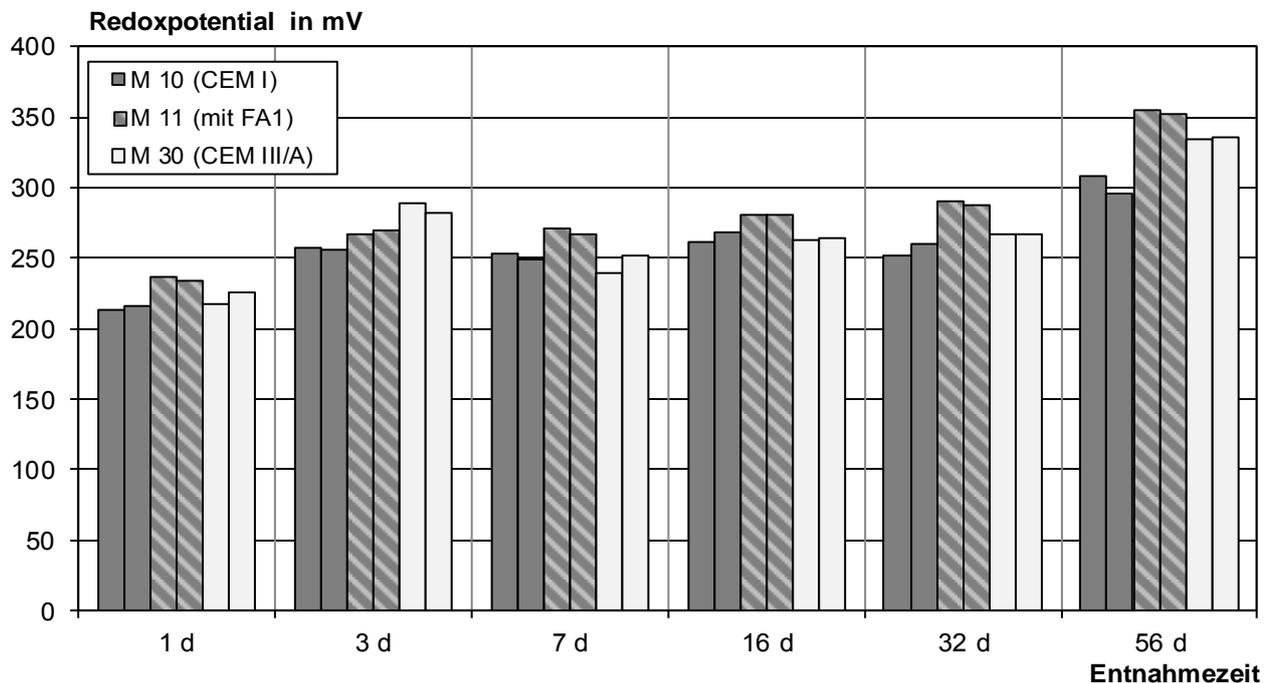
Bild 55 zeigt die elektrischen Leitfähigkeiten der Eluate die in erster Linie von den ausgeaugten Hydroxid-Ionen und Alkalien bestimmt werden. Die Redoxpotentiale sind in Bild 56 dargestellt. Wie beim angeschlossenen Langzeitstandtest nähern sich auch hier in den letzten Eluaten die Redoxpotentiale dem Blindwert an, da die Auslaugung zurückgeht. Signifikante Unterschiede zwischen den Zementen gibt es nicht, obwohl bei Hochofenzement üblicherweise niedrigere Redoxpotentiale in der Porenlösung vorliegen.



**Bild 54:** pH-Werte der Eluate aus dem DAfStb-Langzeitstandtest



**Bild 55:** Elektrische Leitfähigkeiten der Eluate aus dem DAfStb-Langzeitstandtest



**Bild 56:** Redoxpotentiale der Eluate aus dem DAfStb-Langzeitstandtest

#### 4.3.4 Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat

Die kumulative Freisetzung an Natrium, Kalium Chlorid und Sulfat sind in den Bildern 57 und 58 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Schwankungsbreiten der Doppelbestimmungen sehr klein sind. Bei den Alkalien zeigt der Hochofenzementbeton die geringste Freisetzung. Dies ist wahrscheinlich auf die dichte Porenstruktur dieses Bindemittels zurückzuführen. Die Verwendung von Flugasche erhöht die Natriumfreisetzung und reduziert die Kaliumfreisetzung. Bei den Anionen Chlorid und Sulfat zeigt der Hochofenzementbeton die höchsten Freisetzungen, im Fall von Chlorid ist dies auf den hohen Chloridgehalt des Zements zurückzuführen. Bei Sulfat könnten die niedrigeren pH-Werte der Eluate eine Rolle spielen.

Die Auslaugraten der vier Stoffe sind in den Bildern 59 und 60 dargestellt. Die Freisetzung lässt sich hier im doppeltlogarithmischen Maßstab sehr gut durch Geradengleichungen beschreiben. Bei den Alkalien ergeben sich Steigungen zwischen -0,66 und -0,72. Die Auslaugung der Alkalien erfolgt diffusionsgesteuert, wobei der Diffusionskoeffizient offenbar während des Versuchs leicht sinkt, so dass sich Steigungen  $<-0,5$  ergeben. Beim Hochofenzement ist die Zunahme des Diffusionswiderstands am höchsten.

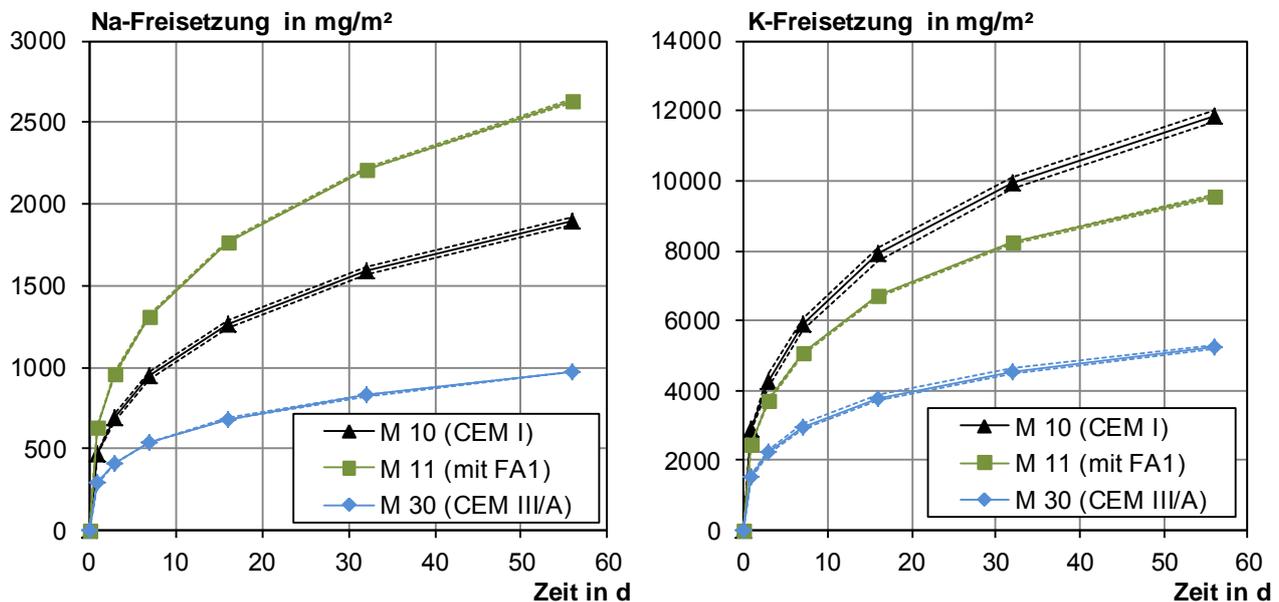


Bild 57: Kumulative Freisetzung von Natrium und Kalium im DAfStb-Langzeitstandtest

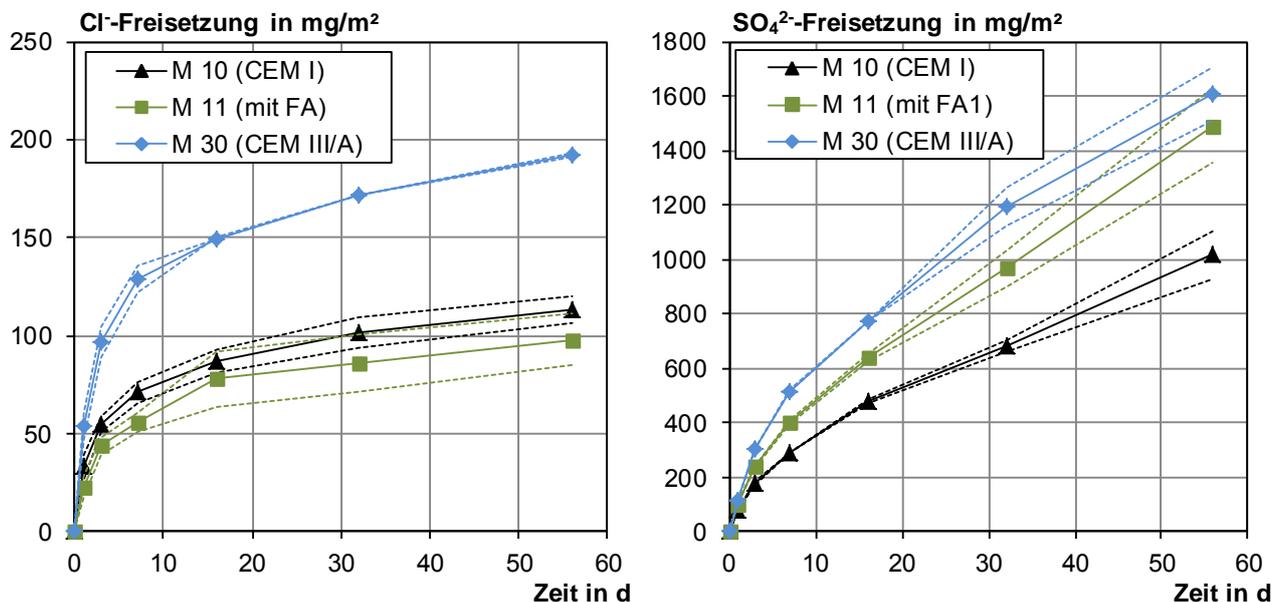


Bild 58: Kumulative Freisetzung von Chlorid und Sulfat im DAfStb-Langzeitstandtest

Die Chloridauslaugraten in Bild 60 fallen etwas steiler ab als die Alkalien, u. U. tritt hier eine Verarmung auf. Beim Parameter Sulfat sind zusätzlich die pH-Werte der Eluate aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass bei diesem Parameter Ausgleichsgeraden mit flacheren Steigungen ermittelt werden (-0,35 bis -0,4). Grund hierfür sind die abnehmenden pH-Werte.

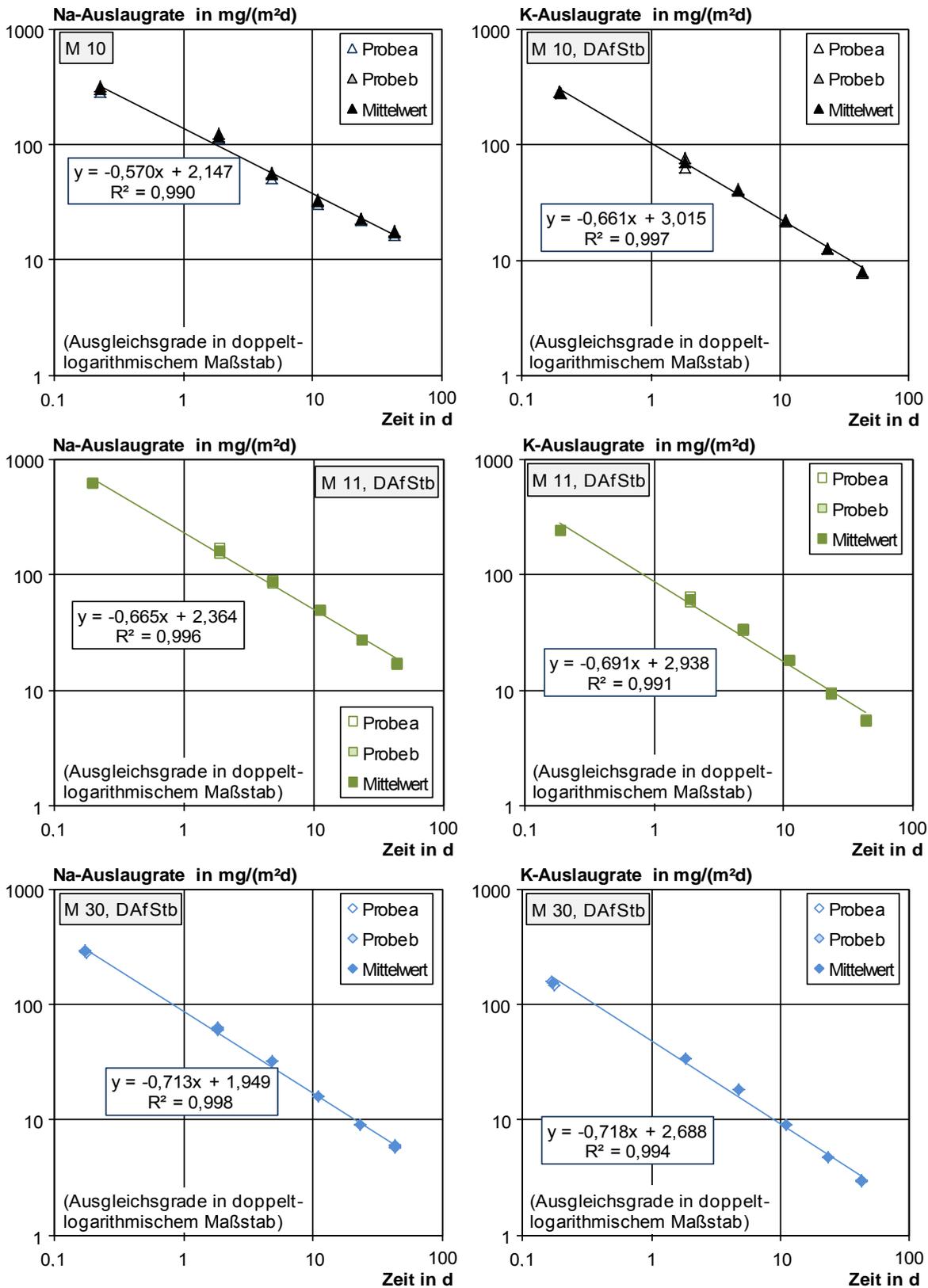


Bild 59: Natrium- und Kaliumauslaugraten im DAFStb-Langzeitstandtest

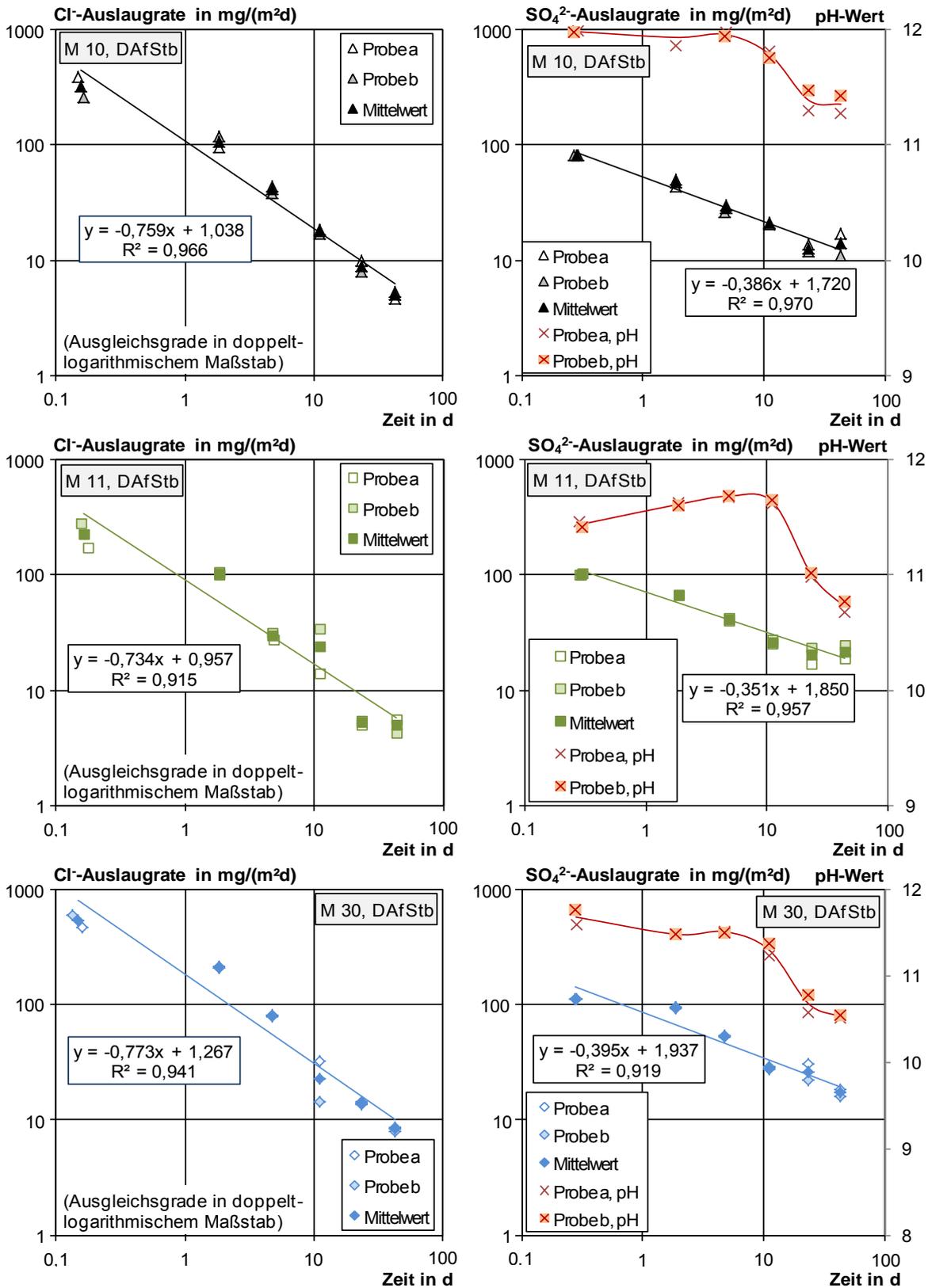
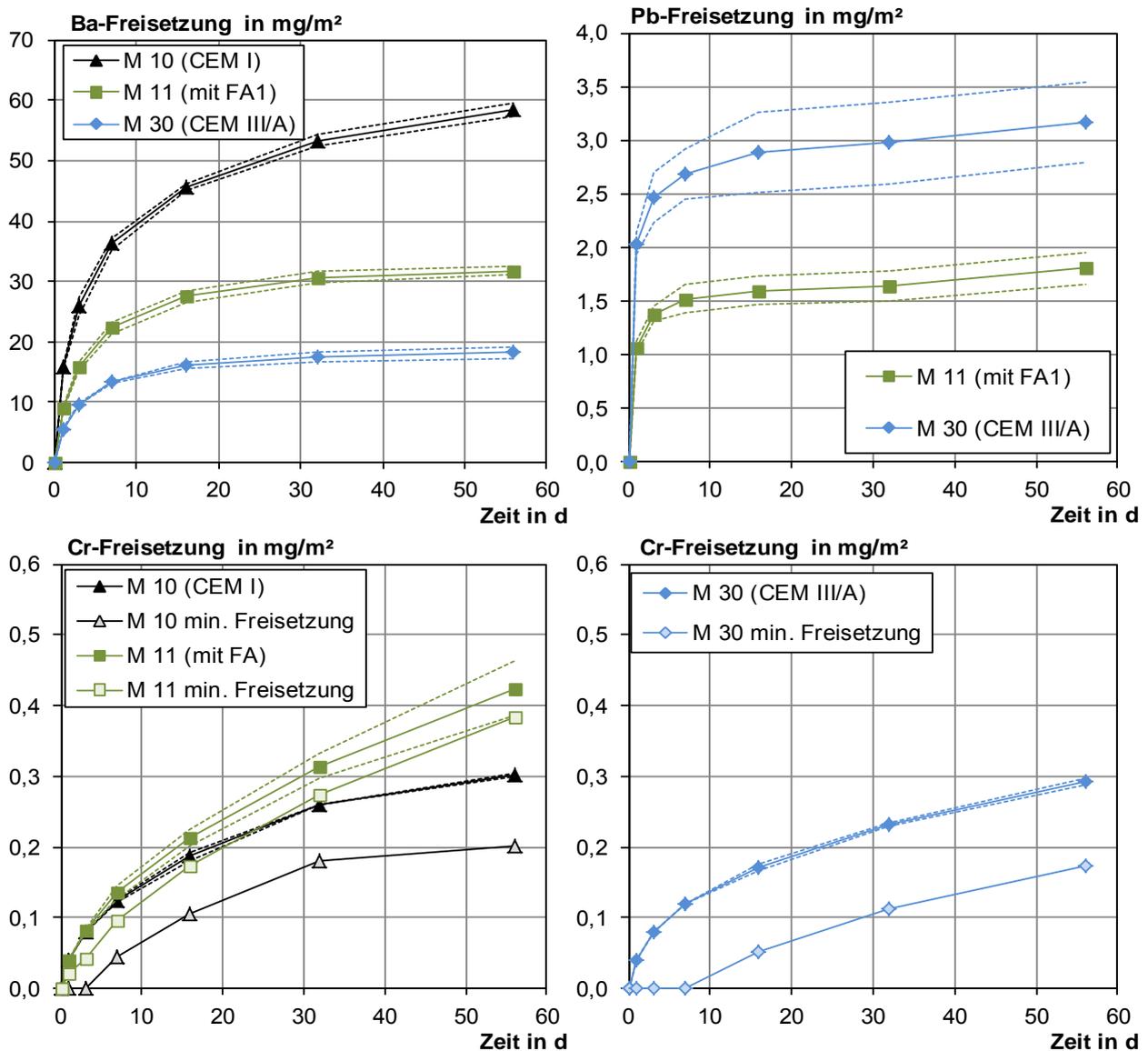


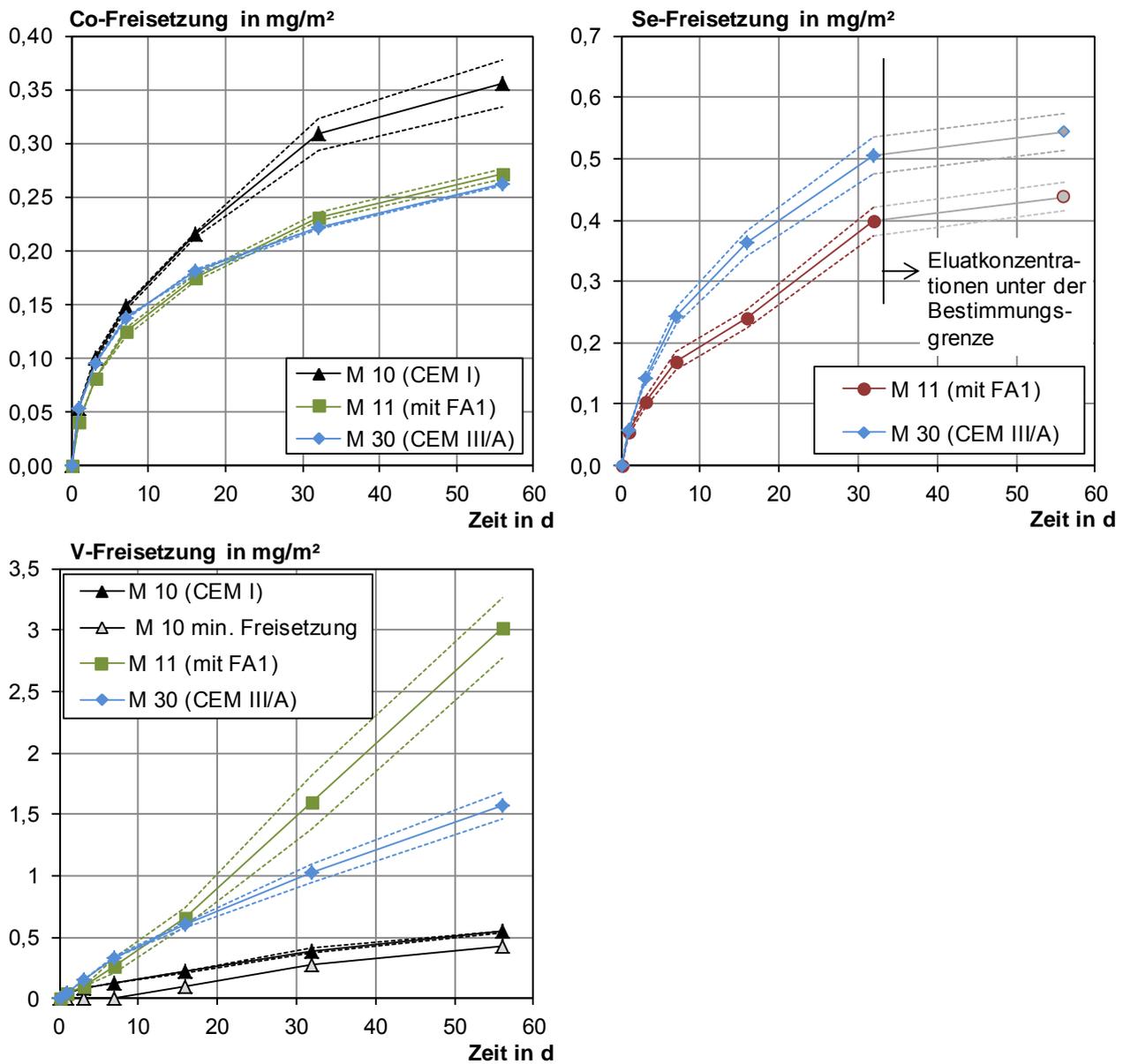
Bild 60: Chlorid- und Sulfatauslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest

### 4.3.5 Spurenelemente und Barium

In Abschnitt 4.4.2.2 wurden die hinsichtlich des Freisetzungsverlaufs auswertbaren Versuchsreihen zusammengestellt. Die berechneten kumulativen Freisetzungen sind in den Bildern 61 und 62 dargestellt. Bei Chrom und Vanadium lagen die Konzentrationen in den ersten Elutionsschritten z. T. unter der Nachweisgrenze. Daher sind in den Bildern auch die minimalen Freisetzungen dargestellt, die sich bei einer Konzentration von Null in diesen Elutionsschritten ergäben.



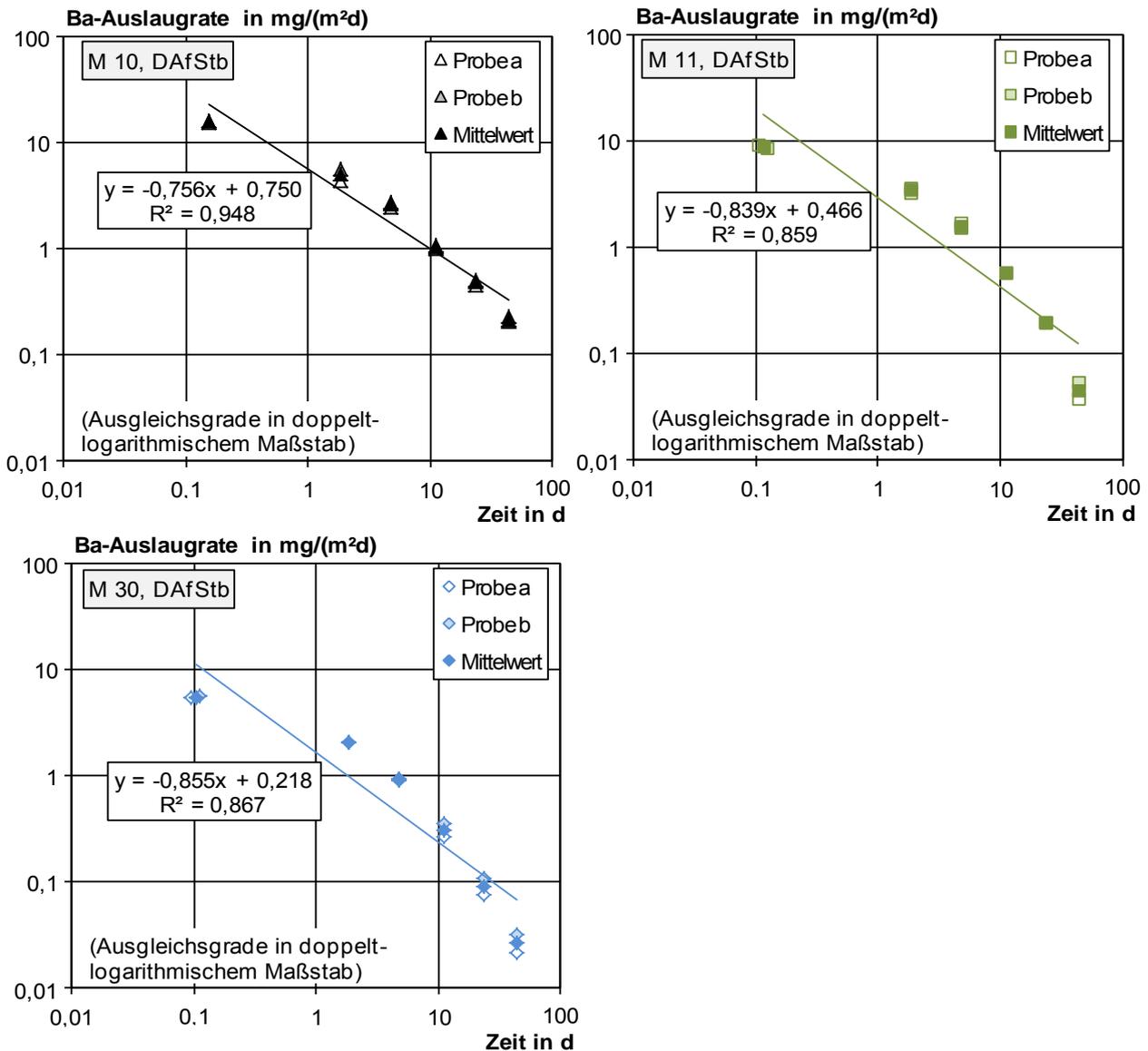
**Bild 61:** Kumulative Freisetzungen von Barium, Blei und Chrom im DAfStb-Langzeitstandtest



**Bild 62:** Kumulative Freisetzungen von Kobalt, Selen und Vanadium im DAfStb-Langzeitstandtest

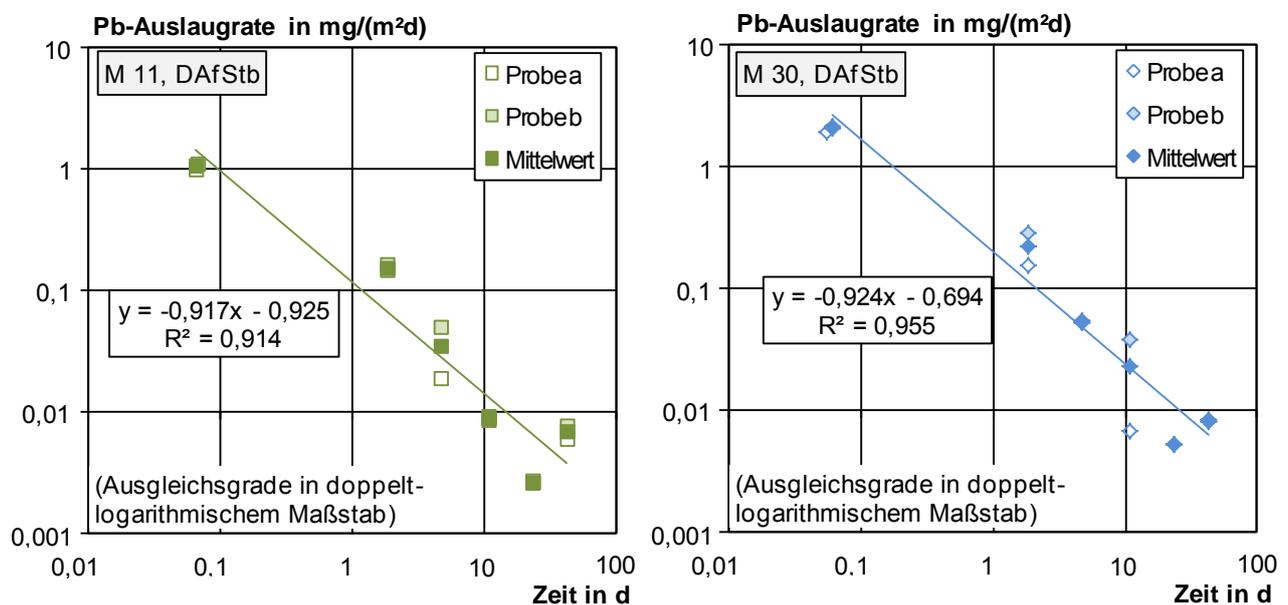
Die Freisetzung der meisten Elemente klingen im Verlauf des Versuchs ab, die Vanadiumfreisetzungen jedoch nicht. Zur differenzierten Betrachtung der Auslaugkinetik sind in den folgenden Bildern die Auslaugraten dargestellt. Die Elutionsschritte zu Versuchsbeginn oder Versuchsende, die systematisch keine nachweisbaren Konzentrationen aufwiesen, sind in den Bildern in Klammern dargestellt.

Wie beim an den Frischbetonstandtest angeschlossenen Langzeitstandtest ergibt sich für den Parameter Barium auch hier keine gute Approximation durch die Gerade, sondern die Auslaugrate klingt zum Versuchsende schneller ab (s. Bild 63). Auch in diesem Versuch zeigt sich somit der gegenläufige Trend zum Auslaugverhalten von Sulfat.



**Bild 63:** Bariumauslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest

Die Bleikonzentrationen waren beim DAfStb-Langzeitstandtest höher als im Langzeitstandtest nach der Frischbetonauslaugung. Blei wird gut in die Klinkerphasen des Zements eingebunden und wird erst im Verlauf der Hydratation zu einem geringen Anteil in die Porenlösung freigesetzt /Vol12/. Dadurch sind die Konzentrationen in der Porenlösung zu Versuchsbeginn des DAfStb-Langzeitstandtest (56 d) höher. Allerdings wird Blei offenbar nur in sehr geringem Maße aus dem Feststoff nachgelöst, sodass die Auslaugraten steiler abfallen als bei den Alkalien (vgl. die Bilder 59 und 64).



**Bild 64:** Bleiauslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest

Chrom und Kobalt zeigen ähnliche Steigungen in den lgJ-Igt-Diagrammen. Sie liegen bei etwa -0,6, lediglich bei der Chromauslaugung von M 11 ist die Steigung flacher. Kobalt wurde wie bei Blei in den Eluaten des Langzeitstandtest nach der Frischbetonauslaugung meist nicht nachgewiesen, beim DAfStb-Langzeitstandtest waren die Konzentrationen dagegen messbar. Wahrscheinlich wird Kobalt ebenfalls während der Hydratation in der Porenlösung freigesetzt. Der gegenteilige Effekt wird bei Kupfer beobachtet, dieses Element war in den Eluaten des DAfStb-Langzeitstandtests i. d. R. nicht nachweisbar und wird hier daher nicht dargestellt.

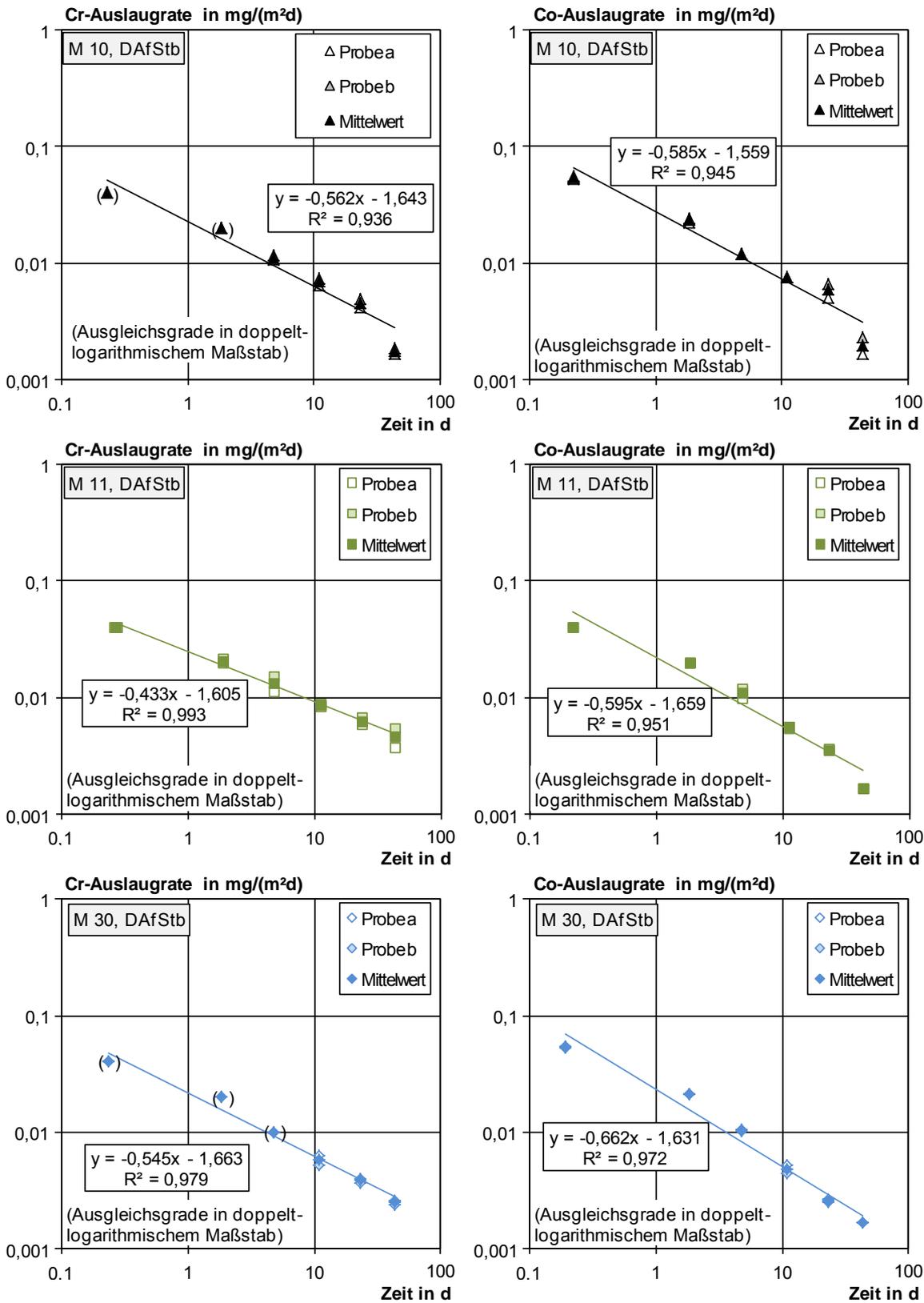
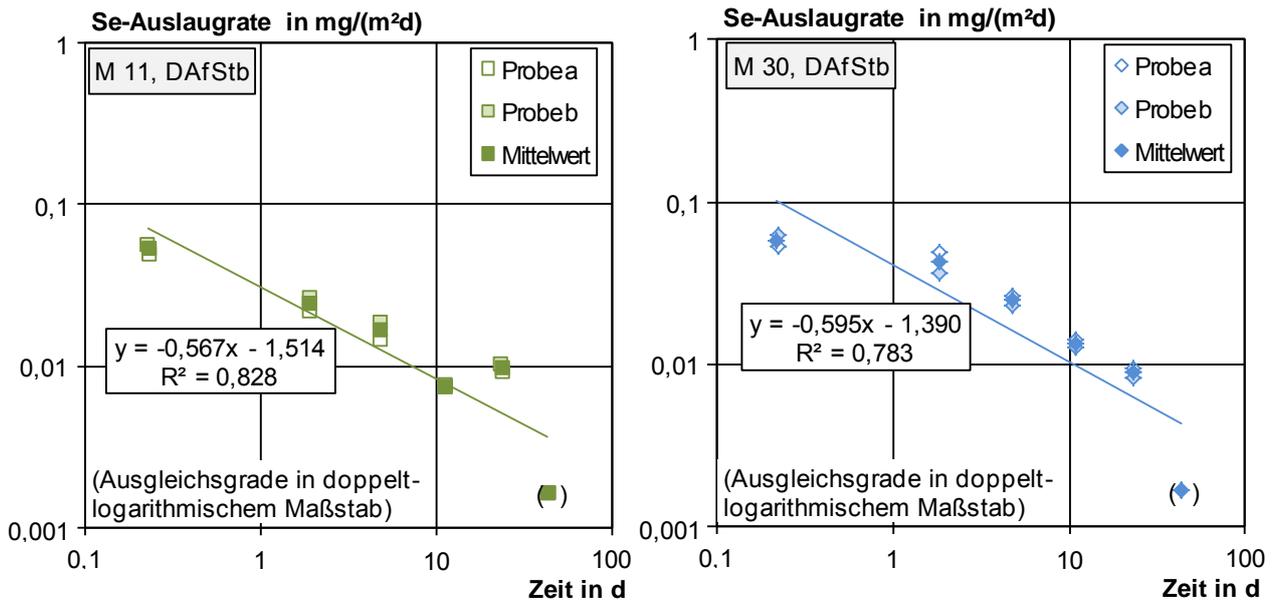


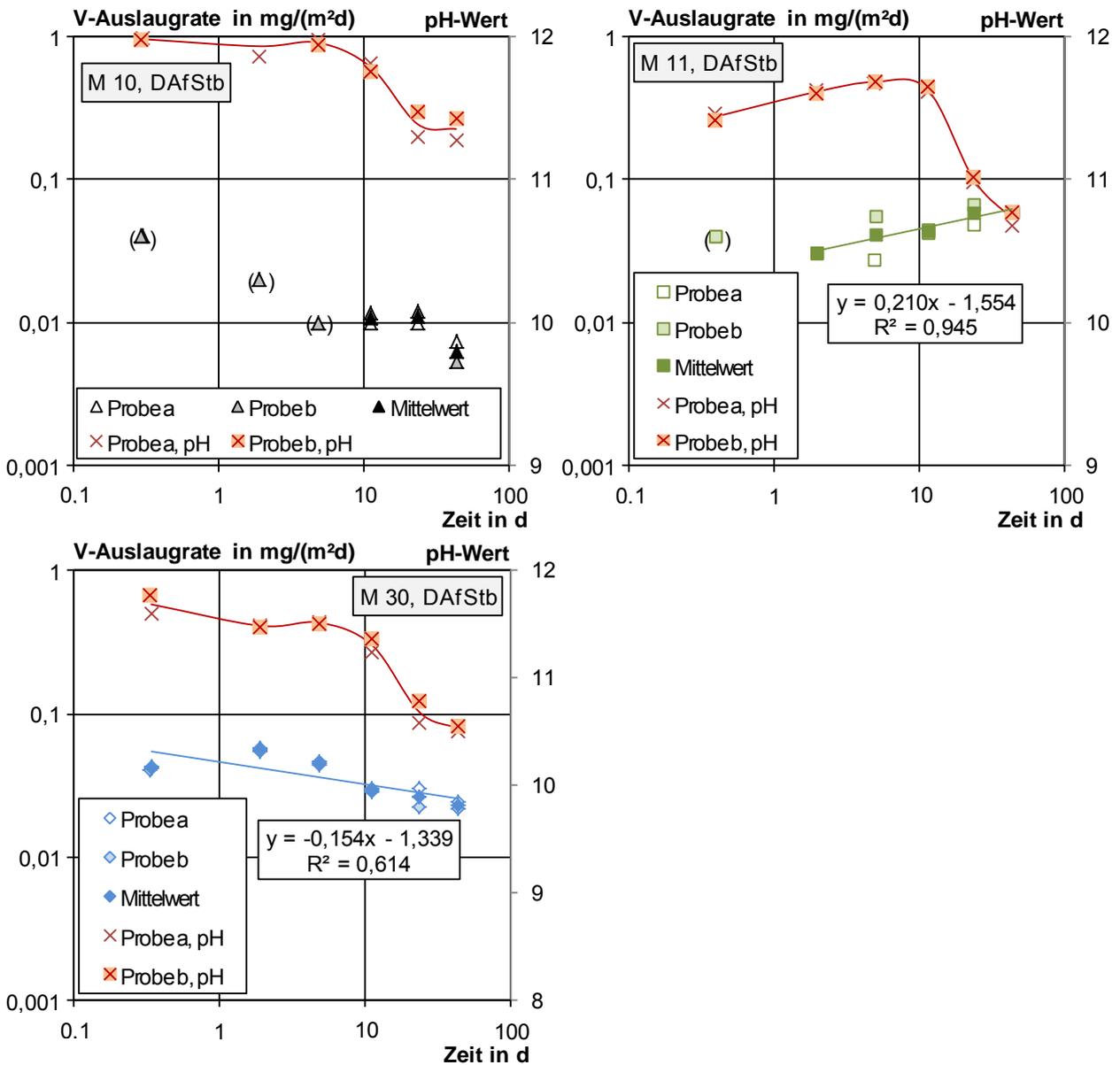
Bild 65: Chrom- und Kobaltauslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest

Bei Selen ist die lineare Approximation des Auslaugverhaltens ungenügend (s. Bild 66), was allerdings auch auf Prüfstreuungen zurückzuführen sein könnte. Die Steigungen betragen etwa -0,6.



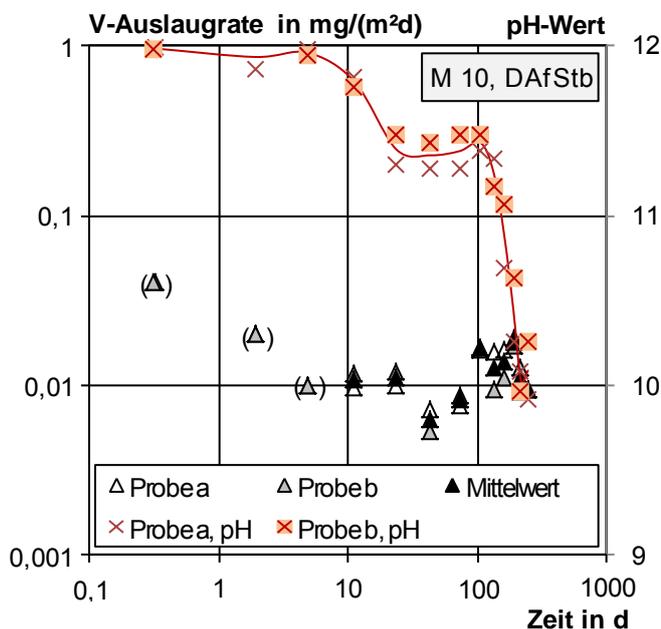
**Bild 66:** Selenauslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest

Abschließend sind in Bild 67 die Auslaugraten von Vanadium dargestellt. Zum Vergleich sind die pH-Werte der Eluate in den Diagrammen enthalten. Die Steigungen sind sehr flach, die Auslaugung verläuft nicht diffusionsgesteuert.



**Bild 67:** Vanadiumauslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest

Unabhängig von diesem Forschungsprojekt wurde der DAfStb-Langzeitstandtest verlängert und zunächst vierwöchentlich, später alle acht Wochen ein Eluentenwechsel durchgeführt. Bild 68 zeigt die Ergebnisse für den Beton M 10 für eine Elutionsdauer von 287 Tagen. Es ist ersichtlich, dass die Auslaugung von Hydroxid-Ionen schließlich soweit zurück geht, dass nur noch pH-Werte von ca. 10 erreicht werden. Die Vanadiumauslaugrate sinkt unter diesen Bedingungen nicht ab, sondern bleibt auf demselben Niveau.



**Bild 68:** Vanadiumauslaugraten im DAfStb-Langzeitstandtest – Fortsetzung des Versuchs bis zum Alter von 287 Tagen

#### 4.4 Gegenüberstellung der Standtests

Ein Ziel dieses Forschungsprojekts war es, die Relevanz der Frischbetonphase für die Umweltverträglichkeit des Baustoffs Beton festzustellen. Es sollte geprüft werden, ob eine separate Bewertung der Frischbetonphase erforderlich ist, oder ob eine Beurteilung anhand des DAfStb-Langzeitstandtests ausreicht. In diesem Abschnitt sollen daher die Ergebnisse des Frischbetonstandtests, des anschließenden Langzeitstandtests und des DAfStb-Langzeitstandtests verglichen werden. Die Parameter Cyanid, Fluorid, Arsen, Cadmium und Quecksilber lagen unter der Nachweisgrenze oder wurden nicht untersucht. Sie werden daher hier nicht behandelt. Antimon, Kobalt, Kupfer, Nickel, Thallium und Zink waren in jedem Versuch nur teilweise oder gar nicht messbar, die Gesamtfreisetzungen lagen in den drei Versuchen jeweils deutlich unter  $1 \text{ mg/m}^2$ . Diese Parameter werden ebenfalls nicht näher betrachtet, es ist jedoch anzumerken, dass für Thallium eine höhere Genauigkeit bei der Analyse angestrebt werden sollte, da die toxikologische Relevanz dieses Schwermetalls sehr hoch ist (Geringfügigkeitsschwelle:  $0,8 \text{ } \mu\text{g/l}$ ). Die Auslaugung von Antimon, Kobalt, Kupfer, Nickel und Zink ist in allen Versuchen so gering, dass keine Beeinträchtigung der Umweltverträglichkeit besteht. Die Gesamtfreisetzungen in den Standtests werden in Tabelle 11 zusammengefasst.

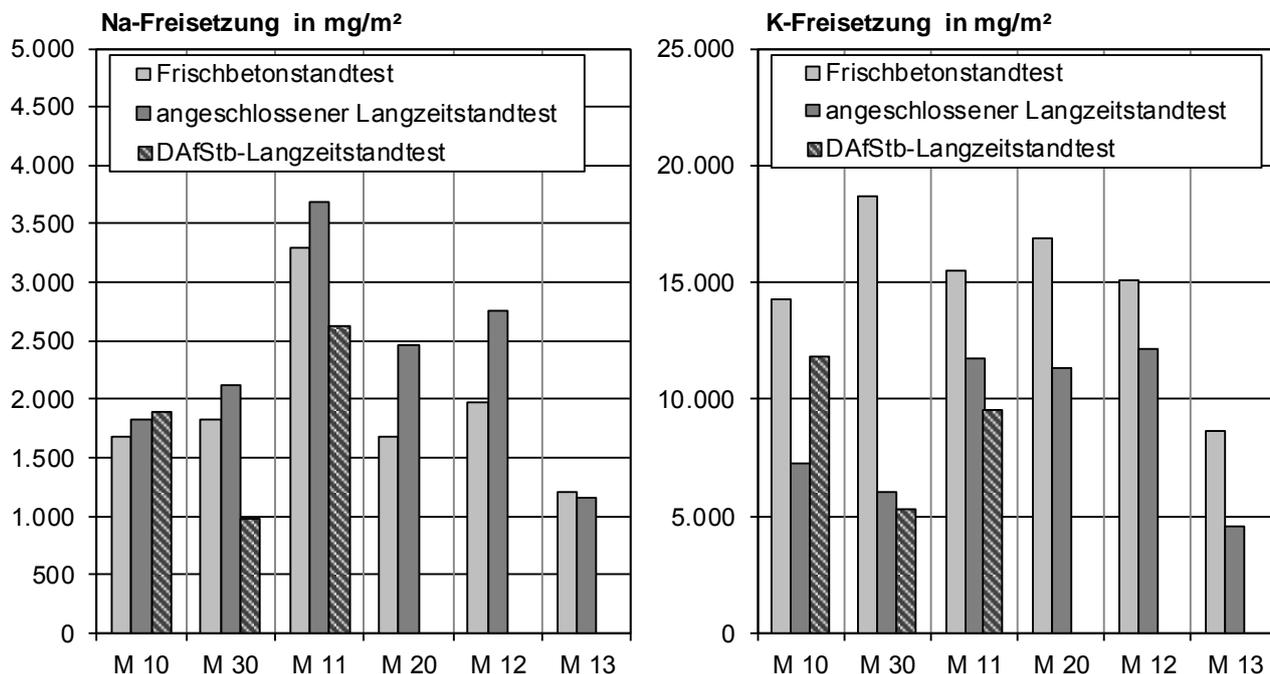
**Tabelle 11:** Kumulative Freisetzungen in den Standtests (Mittelwerte)

Parameter	M10		M11		M30		zul. E <sub>56d</sub> <sup>2)</sup>
	DAfStb	FS-LS <sup>1)</sup>	DAfStb	FS-LS <sup>1)</sup>	DAfStb	FS-LS <sup>1)</sup>	
	mg/m <sup>2</sup>						mg/m <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
Natrium	1896	3502	2628	6992	968	3944	-
Kalium	11844	21515	9552	27265	5268	24661	-
Chlorid	113	807	98	988	192	3601	257732
Sulfat	998	10057	1473	11268	1595	14190	247423
Antimon	0 - 0,48	0 - 0,96	0,15 - 0,51	0,18 - 1,06	0 - 0,48	0,4 - 1,12	5,2
Barium	58,5	79,4	31,8	75,6	18,2	91,3	351
Blei	0,99 - 1,1	0 - 0,48	1,8	0,05 - 0,49	3,2	0 - 0,48	7,2
Chrom	0,2 - 0,3	2,3	0,38 - 0,42	2,8	0,17 - 0,29	2,1	7,2
Kobalt	0,34 - 0,36	0 - 0,48	0,19 - 0,27	0,04 - 0,48	0,18 - 0,26	0,14 - 0,50	8,2
Kupfer	0,15 - 0,29	0,38 - 0,66	0,1 - 0,26	0,33 - 0,63	0,09 - 0,25	0,89	14,4
Molybdän	0 - 0,48	0,46 - 1,26	0 - 0,48	5,5 - 6,1	0 - 0,48	0,59 - 1,3	36,1
Nickel	0 - 0,48	0,04 - 0,48	0 - 0,48	0,18 - 0,54	0 - 0,48	0,1 - 0,5	14,4
Selen	0,16 - 0,3	0,47 - 1,2	0,36 - 0,43	1,6 - 1,9	0,46 - 0,51	1,2 - 1,4	7,2
Thallium	0 - 0,48	0 - 0,96	0 - 0,48	0 - 0,96	0 - 0,48	0,2 - 1,0	0,82
Vanadium	0,42 - 0,54	3,6	3,0	5,3	1,6	5,1	4,1
Zink	0,05 - 0,49	0,47 - 0,73	0,07 - 0,51	0,25 - 0,6	0,5 - 0,74	0,07 - 0,51	59,8

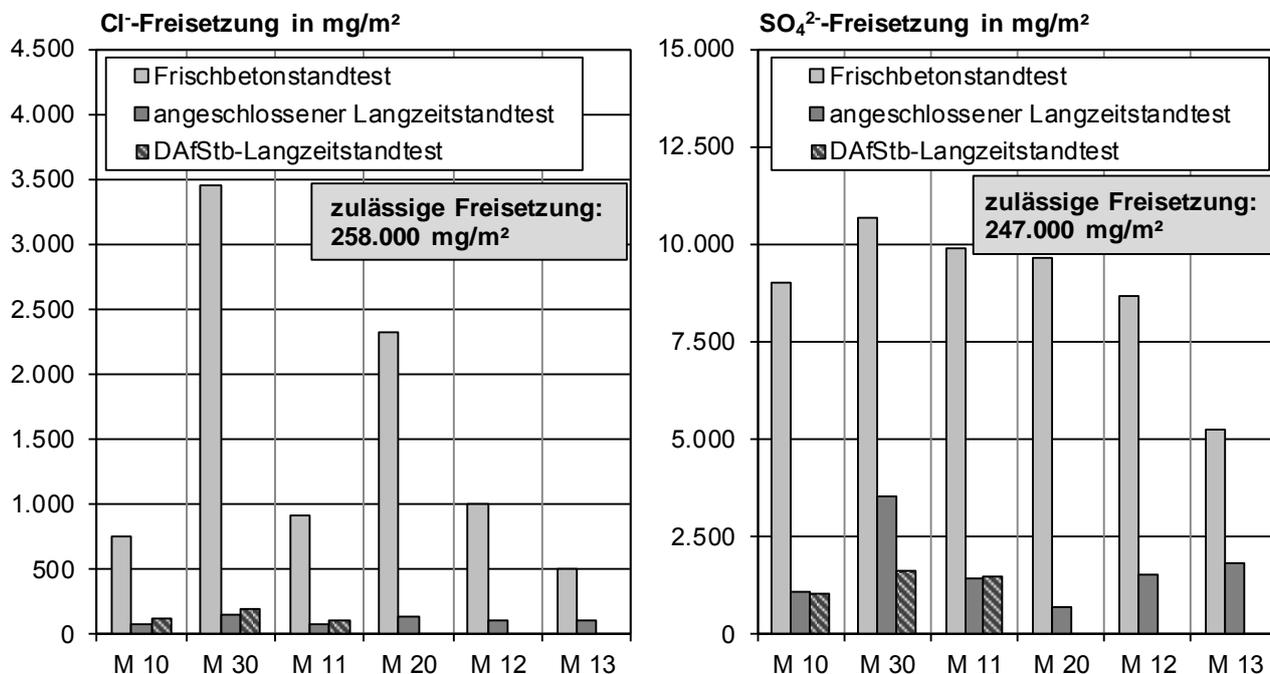
1): Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest, 57 tägige Auslaugung

2): nach /DIB11/ gilt zul. E<sub>56d</sub> nur für DAfStb-Langzeitstandtest an Festbeton

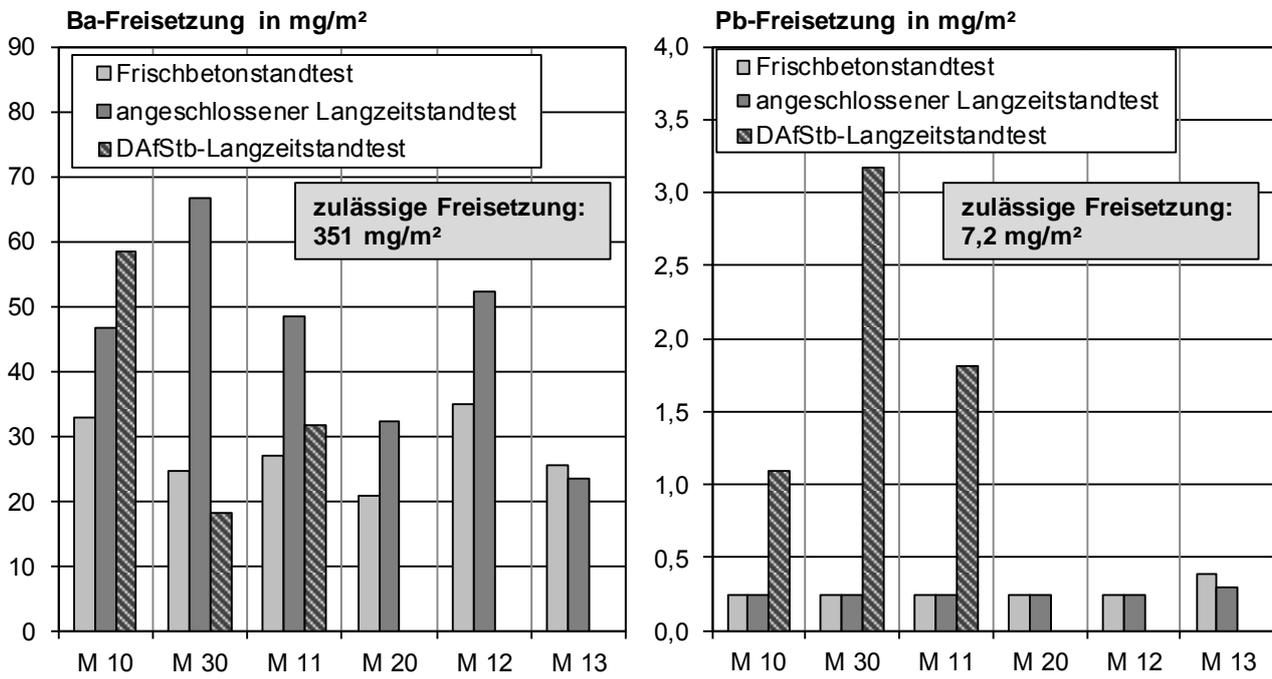
In den folgenden Bildern sind die Gesamtfreisetzungen von Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat, Barium, Blei, Chrom, Kupfer, Molybdän, Nickel, Selen und Vanadium in den Standtests dargestellt und, soweit die Parameter toxikologisch relevant sind, die zulässigen Freisetzungen gemäß /DIB11/ für den DAfStb-Langzeitstandtest angegeben. Berücksichtigt wurden nur die maximalen Freisetzungen.



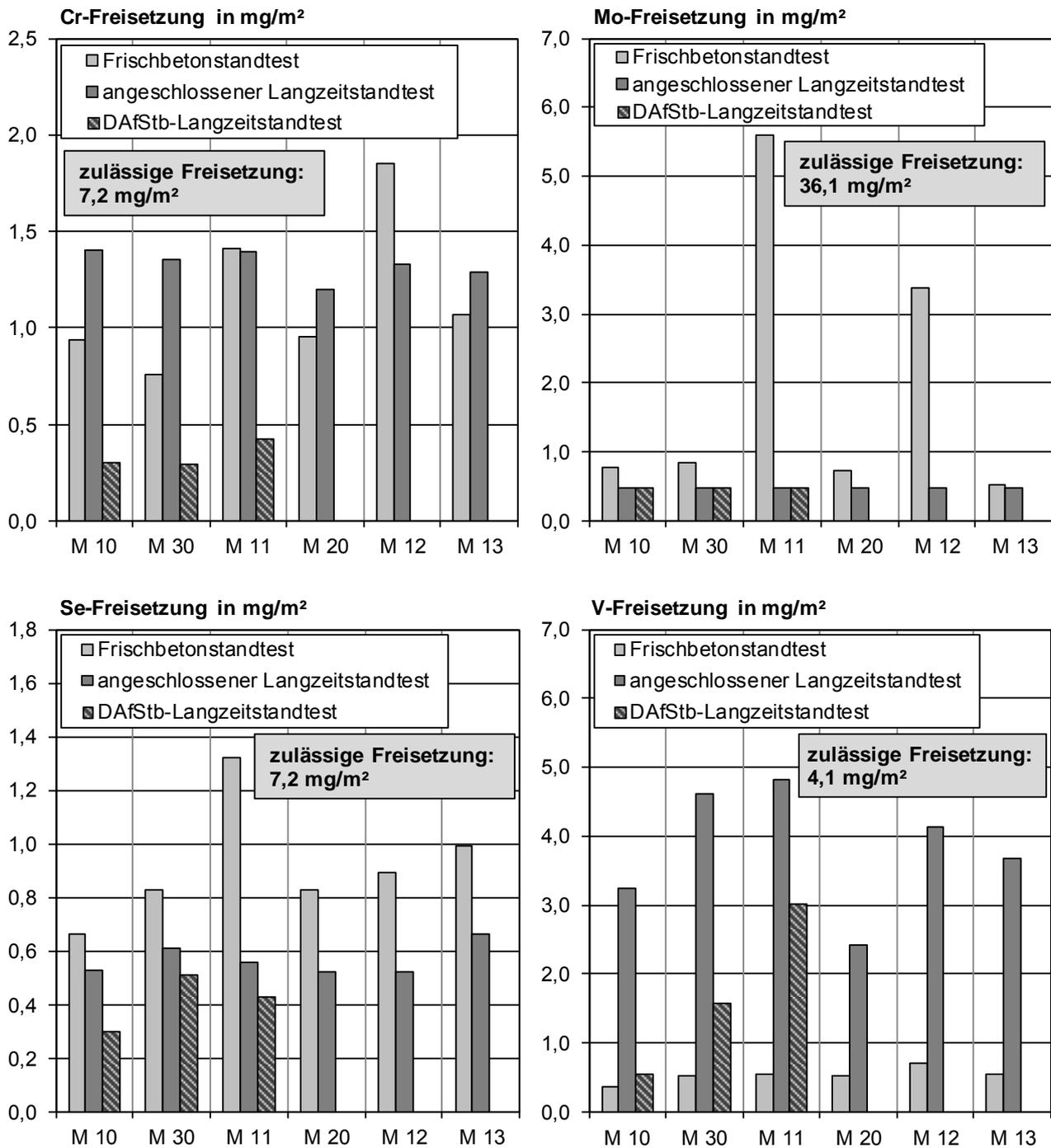
**Bild 69:** Natrium- und Kaliumfreisetzungen im Frischbetonstandtest ( $E_{24h,max}$ ), im angeschlossenen Langzeitstandtest ( $E_{1d-57d,max}$ ) und im DAfStb-Langzeitstandtest ( $E_{56d,max}$ )



**Bild 70:** Chlorid- und Sulfatfreisetzungen im Frischbetonstandtest ( $E_{24h,max}$ ), im angeschlossenen Langzeitstandtest ( $E_{1d-57d,max}$ ) und im DAfStb-Langzeitstandtest ( $E_{56d,max}$ )



**Bild 71:** Barium- und Bleifreisetzungen im Frischbetonstandtest ( $E_{24h,max}$ ), im angeschlossenen Langzeitstandtest ( $E_{1d-57d,max}$ ) und im DAfStb-Langzeitstandtest ( $E_{56d,max}$ )



**Bild 72:** Chrom-, Molybdän-, Selen- und Vanadiumfreisetzungen im Frischbetonstandtest ( $E_{24h,max}$ ), im angeschlossenen Langzeitstandtest ( $E_{1d-57d,max}$ ) und im DAfStb-Langzeitstandtest ( $E_{56d,max}$ )

Nur bei Blei werden im DAfStb-Langzeitstandtest die höchsten Freisetzungen ermittelt. Für dieses Schwermetall ist die bisherige Bewertung der Festbetonphase ausreichend. Für Kalium, Chlorid, Sulfat, Molybdän und Selen werden bei allen Betonen die höchsten Freisetzungen im Frischbetonstandtest ermittelt. Natrium, Barium, Chrom und Vanadium zeigen meist im angeschlossenen Langzeitstandtest die höchsten Freisetzungen. Für diese Parameter ist die Frischbetonphase und die erhöhte Auslaugung in jungem Alter grundsätzlich relevant, allerdings sind die Freisetzungen meist gering im Vergleich zur zulässigen Freisetzung (gültig für Festbeton). Eine Ausnahme stellt Vanadium dar. Bei diesem Parameter wird die zulässige Freisetzung in drei Fällen überschritten. Dabei ist hervorzuheben, dass die zulässige Freisetzung einen diffusionskontrollierten Auslaugprozess voraussetzt. Diese Voraussetzung ist bei Vanadium und einigen anderen Parametern nicht gegeben. In Tabelle 12 sind die Erkenntnisse zur Kinetik der Festbetonauslaugung nochmals zusammengefasst. Molybdän ist nicht berücksichtigt, da bei diesem Schwermetall nur im Frischbetonstandtest eine quantifizierbare Freisetzung auftrat.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Erkenntnisse zur Auslaugkinetik

Parameter	Langzeitstandtest nach Frischbetonauslaugung		DAfStb-Langzeitstandtest	
	Steigungen im IgJ-Igt-Diagramm	Schlussfolgerung	Steigungen im IgJ-Igt-Diagramm	Schlussfolgerung
1	2	3	4	5
Natrium	-0,49 bis -0,76	Diffusionsmodell ist anwendbar	-0,66 bis -0,71	Diffusionsmodell ist anwendbar
Kalium	-0,49 bis -0,80		-0,66 bis -0,72	
Chlorid	-0,54 bis -0,70		-0,73 bis -0,77	
Sulfat	Kein linearer Verlauf im IgJ-Igt-Diagramm	Diffusionsmodell ist nicht gültig, pH-abhängige Auslaugung (Ettringit-zersetzung)	-0,35 bis -0,40	Diffusionsmodell ist nicht gültig, pH-abhängige Auslaugung (Ettringit-zersetzung))
Barium	-0,88 bis -0,95, schlechte Approximation durch die Gerade (degressiver Verlauf)	Diffusionsmodell ist anwendbar, liegt jedoch deutlich auf der sicheren Seite	-0,76 bis -0,86 schlechte Approximation durch die Gerade (degressiver Verlauf)	Diffusionsmodell ist anwendbar, liegt jedoch deutlich auf der sicheren Seite
Blei	Konzentrationen meist nicht messbar, keine Auswertung durchgeführt	Freisetzung ist unproblematisch	-0,92	Diffusionsmodell ist anwendbar, liegt jedoch deutlich auf der sicheren Seite
Chrom	-0,25 bis -0,35,	Diffusionsmodell ist nicht gültig, vermutlich Beeinflussung der Auslaugung durch den pH-Wert	-0,43 bis -0,57	Diffusionsmodell ist anwendbar, möglicherweise Beeinflussung bei stärker sinkenden pH-Werten
Selen	Konzentrationen meist nicht messbar, keine Auswertung	Freisetzung ist unproblematisch	-0,58 bis -0,60	Diffusionsmodell ist anwendbar
Vanadium	Kein linearer Verlauf im IgJ-Igt-Diagramm	Diffusionsmodell ist nicht gültig, pH-abhängige Auslaugung	0,21 bis -0,15	Diffusionsmodell ist nicht gültig, Beeinflussung der Auslaugung durch den pH-Wert

## **4.5 Dynamischer Versuch**

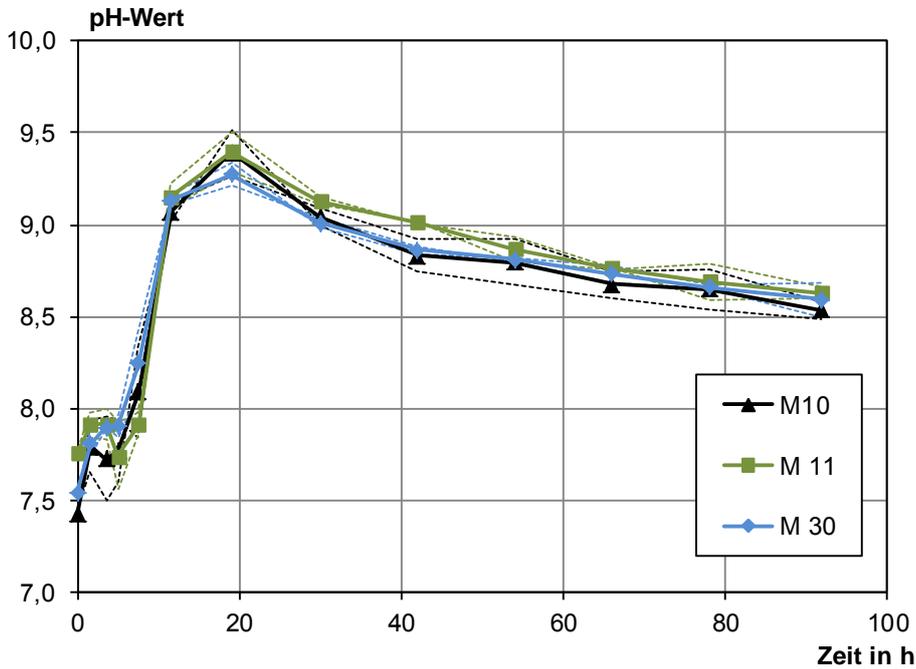
### **4.5.1 Ergebniszusammenstellung**

Die Analyseergebnisse des dynamischen Versuchs sind in den Tabellen A23 bis A28 im Anhang zusammengestellt. Die Parameter Cyanid, Fluorid, Arsen, Cadmium und Quecksilber wurden aufgrund der geringen Konzentrationen in den vorangegangenen Versuchen hier nicht analysiert. Aus den Tabellen geht hervor, dass die Konzentrationen an Antimon, Nickel, Thallium und Zink fast durchgehend unter der Bestimmungsgrenze lagen. Auf diese Parameter wird daher nicht weiter eingegangen. Alle übrigen Parameter sind im Anhang in den Bildern B1 bis B8 graphisch im Verlauf der Zeit dargestellt. Die Konzentrationen wurden dabei über der Mitte des Elutionsschritts aufgetragen, da Mischeluate untersucht worden sind (vgl. Abschnitt 2.3). Auch in diesem Versuch wurden für einige Parameter Konzentrationen zwischen Nachweisgrenze und Bestimmungsgrenze angegeben, die mit Unsicherheiten behaftet sind.

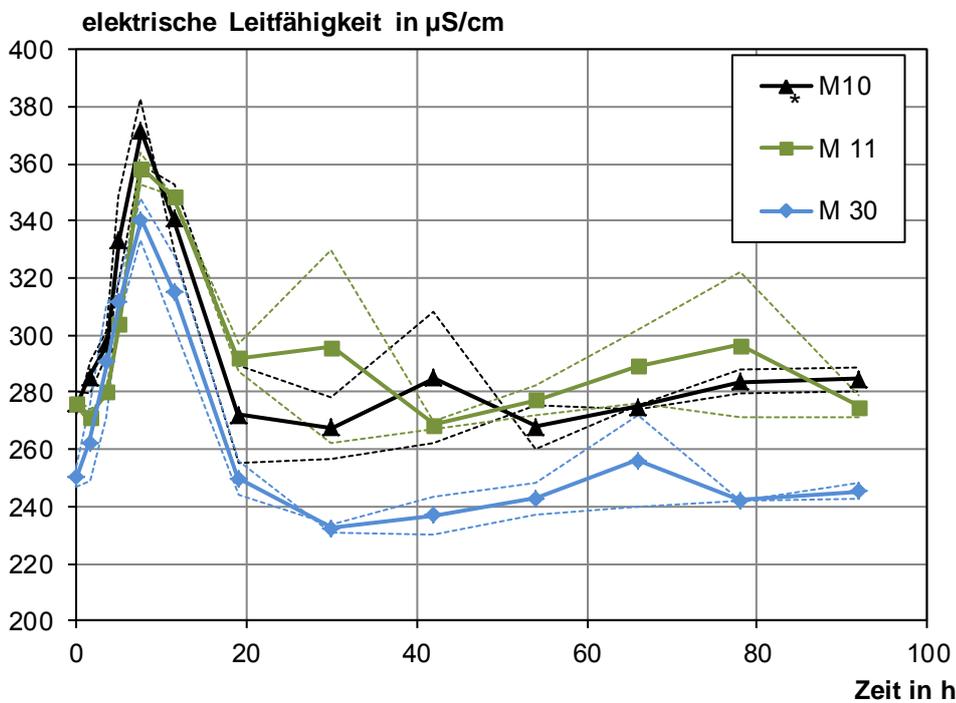
Die Bilder zeigen, dass der dynamische Versuch eine relativ gute Reproduzierbarkeit aufweist. Es wurden nur sehr wenige ausreißerverdächtige Ergebnisse gefunden, die in den Tabellen A23 bis A28 und den Bildern B1 bis B8 entsprechend markiert sind. Diese Ergebnisse wurden bei der folgenden Auswertung nicht berücksichtigt.

### **4.5.2 pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Redoxpotential**

Zum besseren Vergleich der untersuchten Mischungen sind in den folgenden Bildern jeweils alle Versuche in einem Bild dargestellt. Die Bilder 73 und 74 zeigen die pH-Werte bzw. die elektrischen Leitfähigkeiten. Wegen der höheren Verdünnung sind die elektrischen Leitfähigkeiten beim dynamischen Versuch deutlich geringer als bei den Standtests. Vergleicht man die pH-Werte und die elektrischen Leitfähigkeiten, so ist festzustellen, dass das Maximum beim pH-Wert erst nach etwa 20 h erreicht wird, während die Leitfähigkeit bereits nach rund 8 h ihr Maximum erreicht. Dieser Trend wurde bereits in früheren Untersuchungen festgestellt (s. /Bra07a/). Der pH-Wert-Anstieg wird höchst wahrscheinlich durch die Pufferkapazität von Boden und Leitungswasser verzögert. Während die Leitfähigkeit während der Versuchslaufzeit wieder auf das Niveau der Blindwerte abfällt, ist der pH-Wert auch im letzten Eluat noch deutlich erhöht.

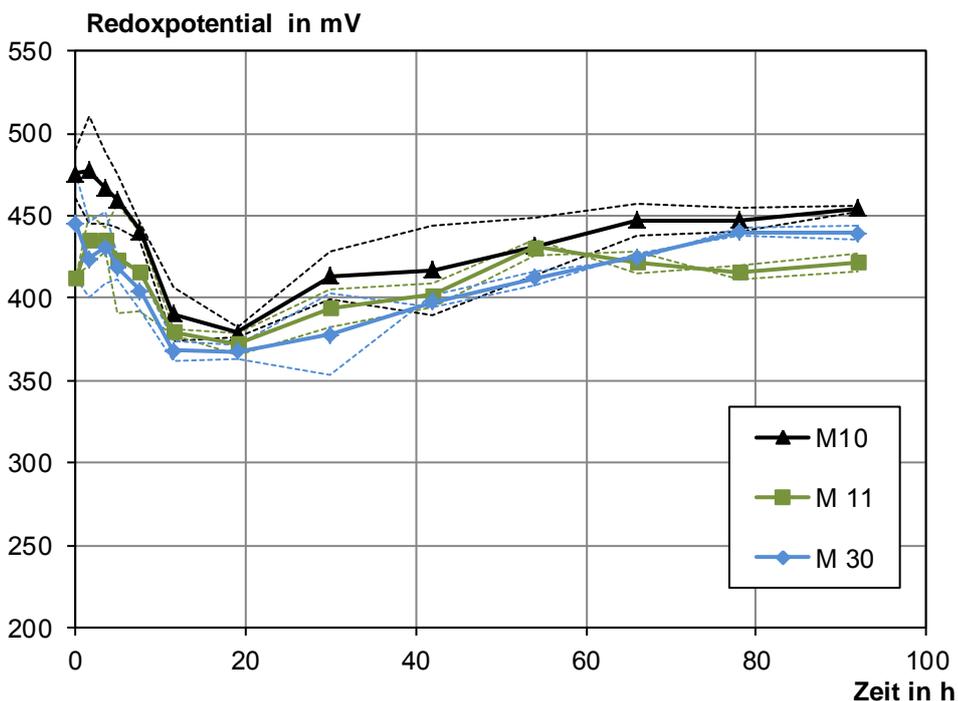


**Bild 73:** pH-Werte der Eluate des dynamischen Versuchs



**Bild 74:** Elektrische Leitfähigkeiten der Eluate des dynamischen Versuchs

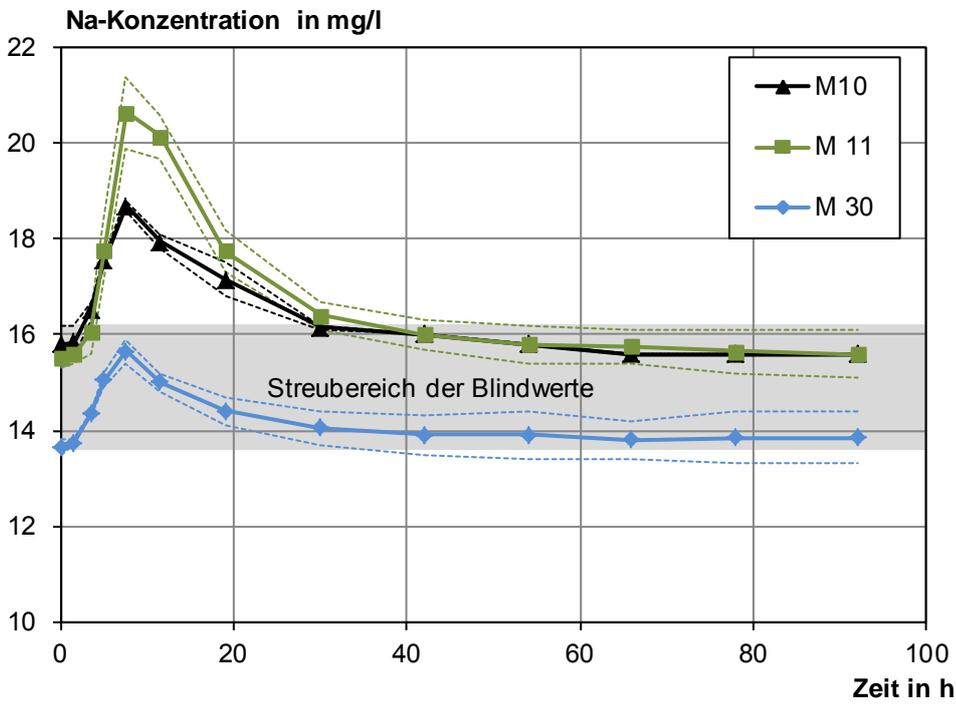
Die Blindwerte des Redoxpotentials streuten im Bereich von 410 bis 490 mV. Durch die Auslaugung fällt das Redoxpotential ab (s. Bild 75). Bis zum Ende der Versuchslaufzeit wird das ursprüngliche Niveau wieder erreicht. Signifikante Unterschiede zwischen dem Beton mit Hochofenzement (M 30) und den Mischungen mit Portlandzement sind, wie bei den vorhergehenden Auslaugversuchen, nicht ersichtlich.



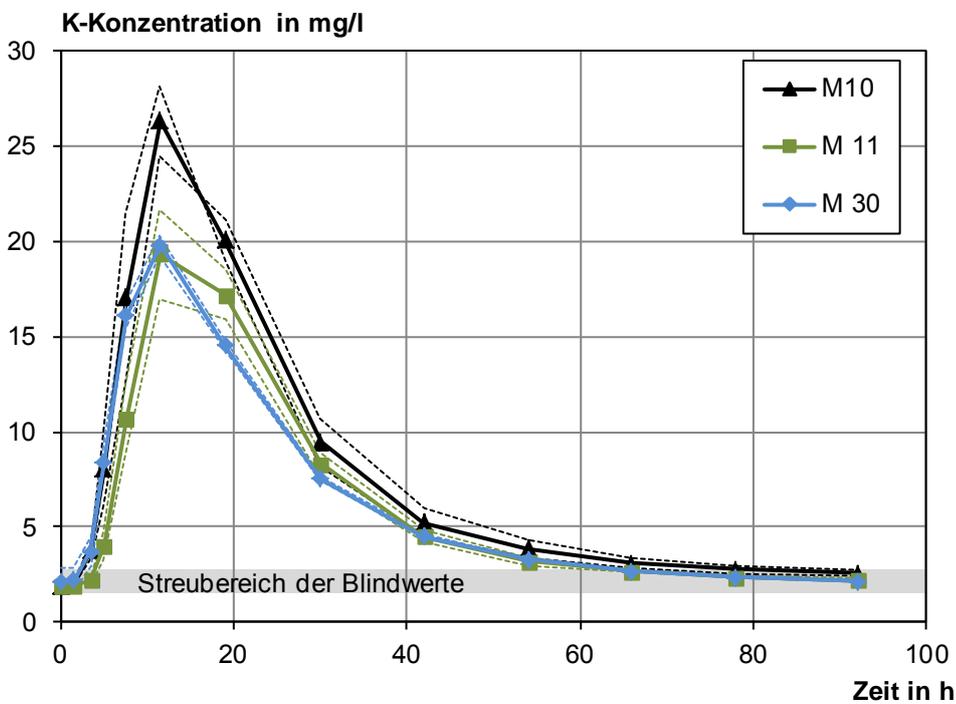
**Bild 75:** Redoxpotentiale der Eluate des dynamischen Versuchs

### 4.5.3 Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat

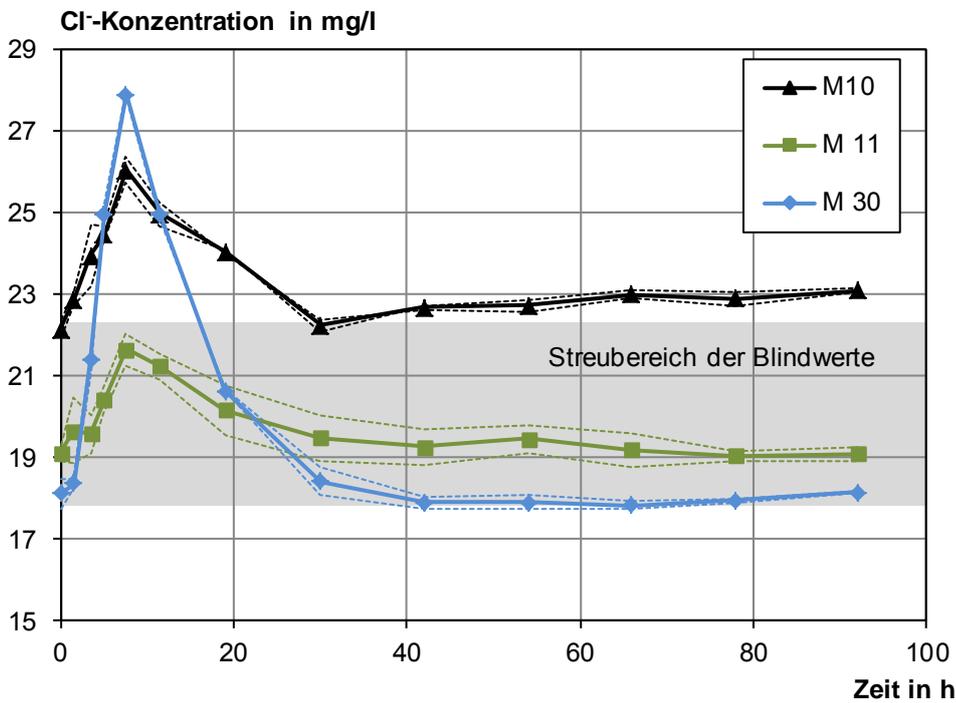
Die Bilder 76 bis 79 zeigen die Konzentrationsverläufe von Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat. Es ist eine gute Reproduzierbarkeit festzustellen. Die maximalen Konzentrationen an Natrium, Chlorid und Sulfat traten wie bei der elektrischen Leitfähigkeiten im vierten Eluat auf, bei Kalium dagegen erst im fünften. Diese leichte Retardierung ist auf Sorptions-effekte im Sandboden zurückzuführen.



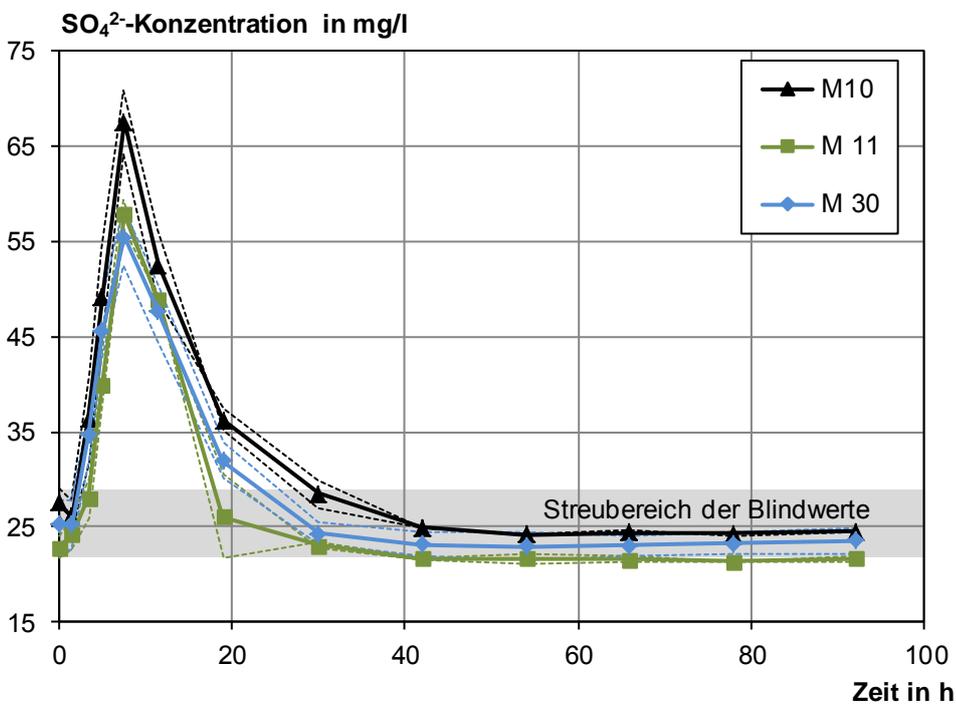
**Bild 76:** Verlauf der Natriumkonzentrationen der Eluate des dynamischen Versuchs



**Bild 77:** Verlauf der Kaliumkonzentrationen der Eluate des dynamischen Versuchs

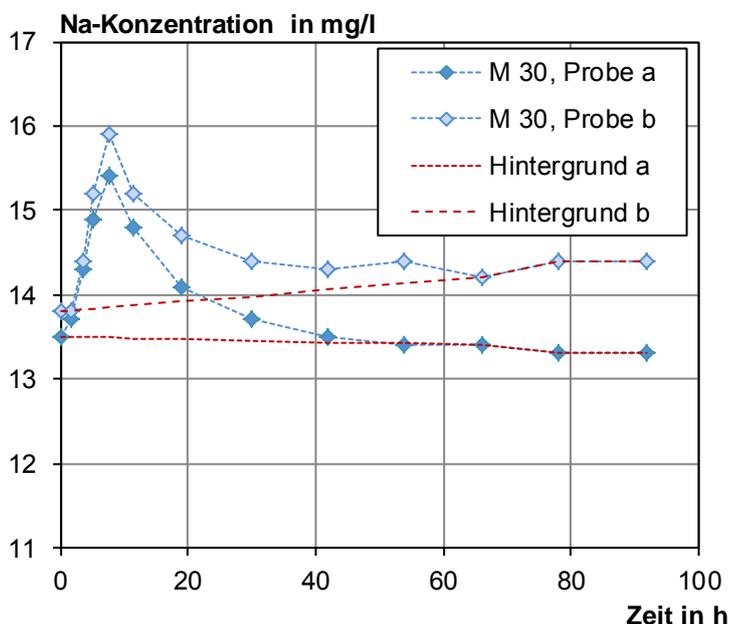


**Bild 78:** Verlauf der Chloridkonzentrationen der Eluate des dynamischen Versuchs



**Bild 79:** Verlauf der Sulfatkonzentrationen der Eluate des dynamischen Versuchs

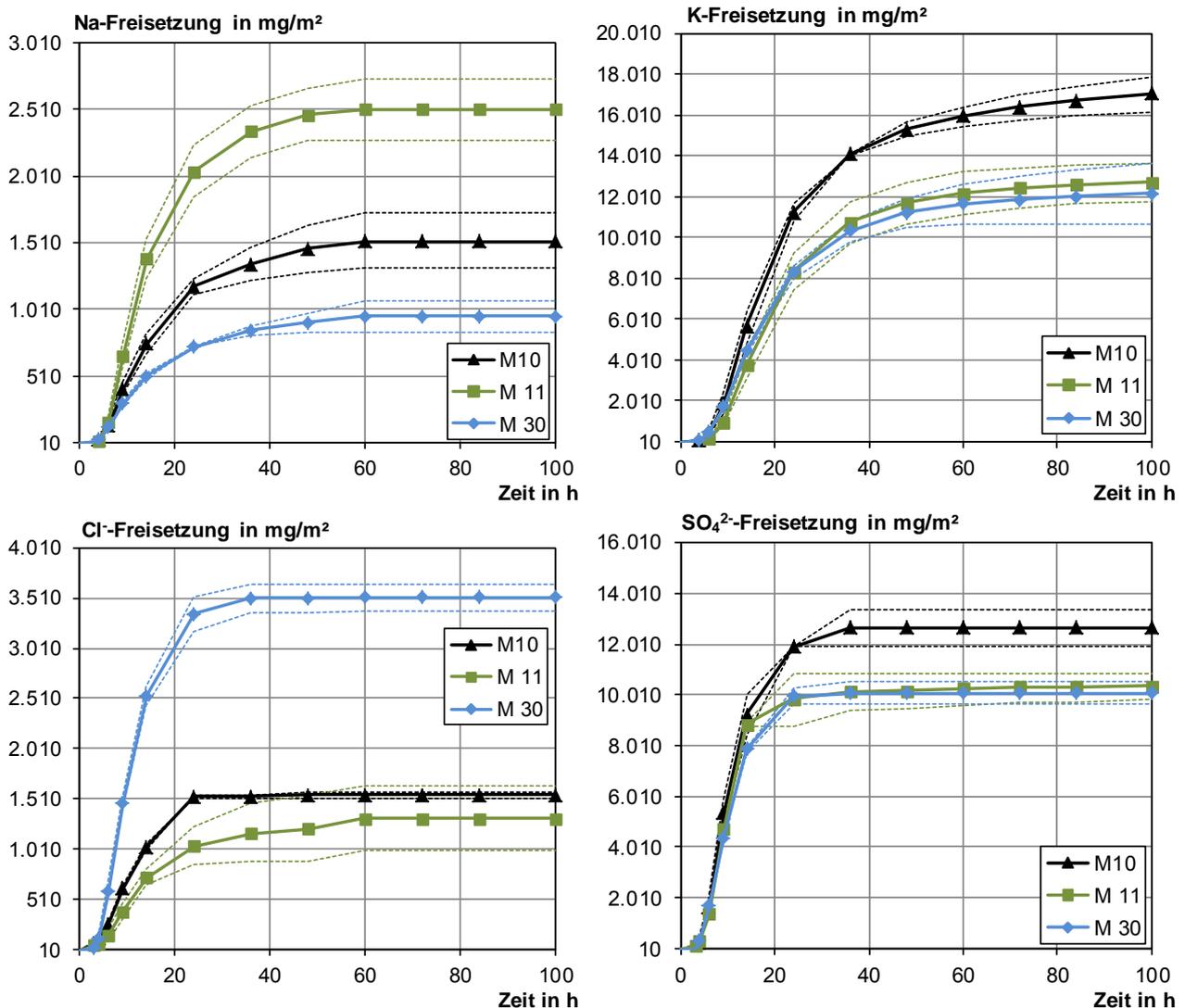
Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben wurde anhand der Eluatkonzentrationen die Freisetzung berechnet. Zur Korrektur müssen die Hintergrundwerte herangezogen werden. Dies ist insbesondere bei Natrium und Chlorid problematisch, da die Hintergrundwerte über einen großen Konzentrationsbereich streuen und sich z. T. offenbar während des Versuchs ändern. Dadurch ergeben sich zum Ende des Versuchs Konzentrationen, die teilweise über, teilweise unter dem anfänglichen Hintergrundwert liegen. Wird der anfängliche Hintergrundwert für alle Eluate angesetzt, so ergeben sich stark differierende Freisetzungsverläufe, die nicht realistisch sind. Die Änderung der Hintergrundwerte von Natrium und Chlorid musste daher berücksichtigt werden. Die Konzentrationsverläufe in Bild 76 und Bild 78 zeigen eine starke Konzentrationserhöhung durch die Auslaugung innerhalb der ersten 20 Stunden. Dieser Konzentrationsanstieg geht nach spätestens 60 Stunden zurück. Der Verlauf der Hintergrundkonzentration wurde daher für Natrium und Chlorid linear zwischen dem Blindwert und der Konzentration des 10. Eluats (66 h) interpoliert, wie in Bild 80 für die Natriumkonzentrationen der Mischung M 30 dargestellt.



**Bild 80:** Exemplarische Darstellung der ange-setzten Hintergrundkonzentrationen (Beispiel M 30, Natrium)

Bei Kalium und Sulfat wurde der anfängliche Hintergrundwert für alle Eluate angesetzt. Bei allen vier Stoffen wurde eine Unterschreitung der Hintergrundwerte nicht berücksichtigt, d. h. der Term  $(c_i - c_0)$  aus Gleichung 7, Abschnitt 3.3, wurde bei diesen Eluaten auf Null gesetzt.

Bild 81 zeigt den Freisetzungverlauf für die vier Nebenbestandteile. Wie bereits in Abschnitt 4.2.3.1 bei der Diskussion der Ergebnisse des Frischbetonstandtests erläutert, hat die Verwendung der Flugaschen wahrscheinlich zu einem Anstieg der Natriumkonzentration in der Porenlösung geführt. Dies hatte auch im dynamischen Versuch eine Erhöhung der Natriumfreisetzung zur Folge. Die Kalium- und Sulfatfreisetzungen werden dagegen wie im Frischbetonstandtest durch Flugasche und auch durch Hüttensand verringert.



**Bild 81:** Freisetzungverläufe der Nebenbestandteile Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat im dynamischen Versuch

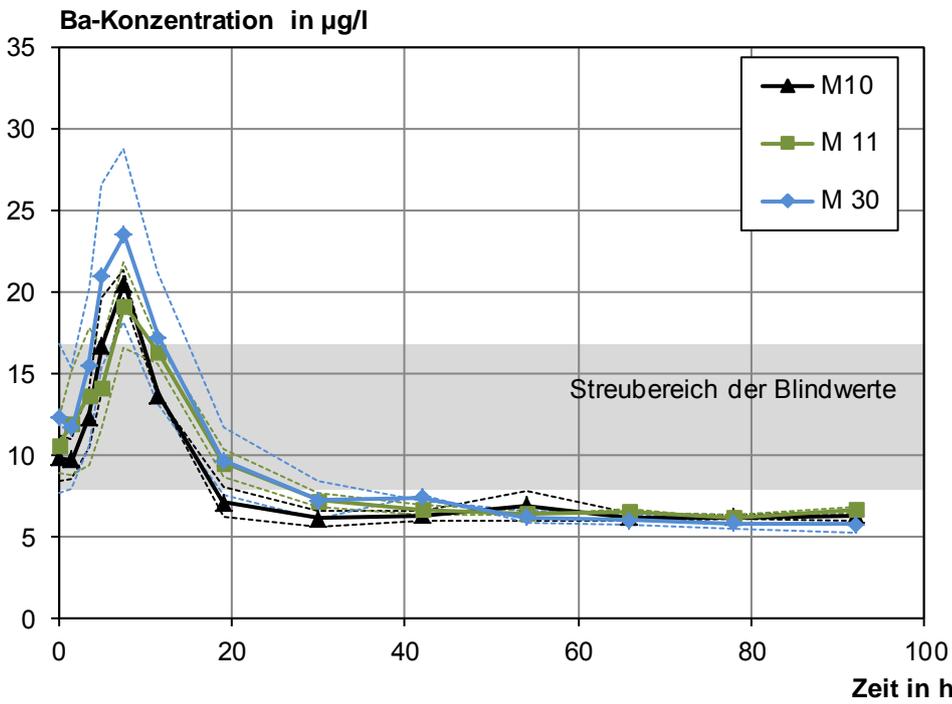
Die Chloridfreisetzung von M 30 ist auch in diesem Versuch die Freisetzung aufgrund des 10-fach höheren Gesamtgehalts im Vergleich zu den anderen Betonen erhöht.

#### 4.5.4 Spurenelemente und Barium

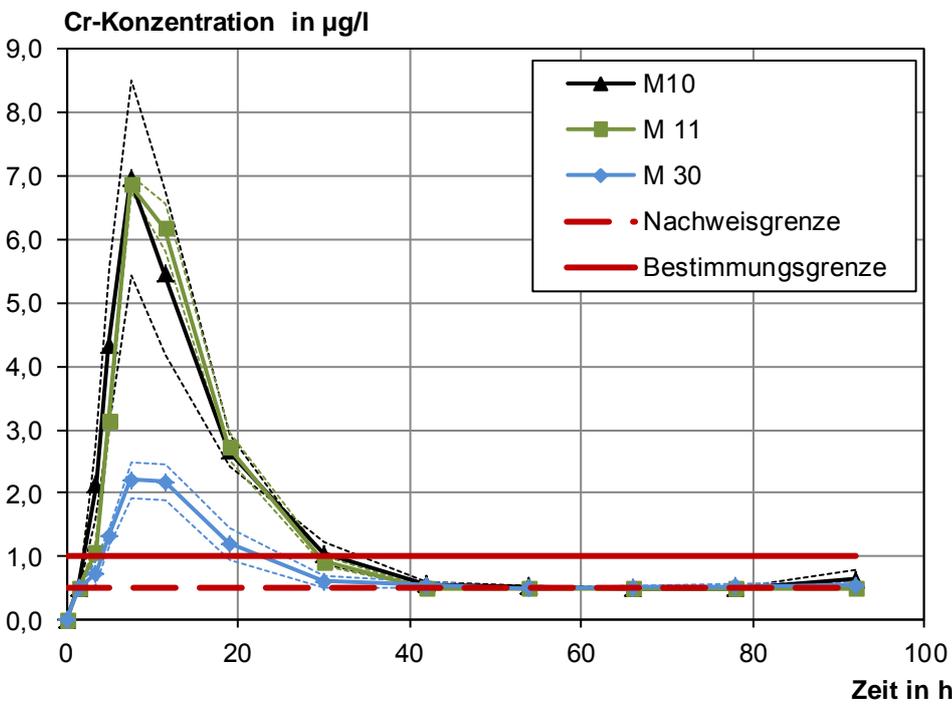
In diesem Abschnitt wird auf die Elemente Barium, Chrom, Molybdän, Selen und Vanadium näher eingegangen. Antimon, Nickel, Thallium und Zink werden nicht behandelt, da die Konzentrationen fast durchgehend unter der Bestimmungsgrenze lagen. Bei Blei und Kobalt lagen die Konzentrationen bei einigen Eluaten oberhalb der Bestimmungsgrenze, meist jedoch zwischen Nachweis- und Bestimmungsgrenze (vgl. Bild B5 und B6 im Anhang). Die Ergebnisse zeigen, dass beide Spurenelemente nicht in signifikanten Mengen freigesetzt werden. Bei Kupfer streuten die Konzentrationen unsystematisch (s. Bild B7) und lagen im Bereich der Hintergrundwerte; auch hier erfolgte keine Auswertung der Freisetzung.

Bild 82 zeigt die Konzentrationsverläufe für Barium. Wie bei Natrium tritt die Maximalkonzentration im 4. Eluat auf. Bei allen Versuchen sinken die Konzentrationen nach der anfänglichen Freisetzung unter das Niveau der Hintergrundwerte ab, d. h. es tritt eine Adsorption am Beton auf. Dieser Effekt ist auch in früheren Untersuchungen im dynamischen Versuch mit Leitungswasser beobachtet worden (s. /Bra07a/). Die drei Betonrezepturen unterscheiden sich in Bezug auf Barium nicht signifikant.

Die maximale Chromkonzentration wurde im 4. Eluat gemessen. Spätestens im 9 Eluat (54 h) wurde die Nachweisgrenze wieder unterschritten (s. Bild 83). Der Beton M 30 mit Hochofenzement weist erheblich geringere Konzentrationen auf, als die anderen beiden Mischungen.

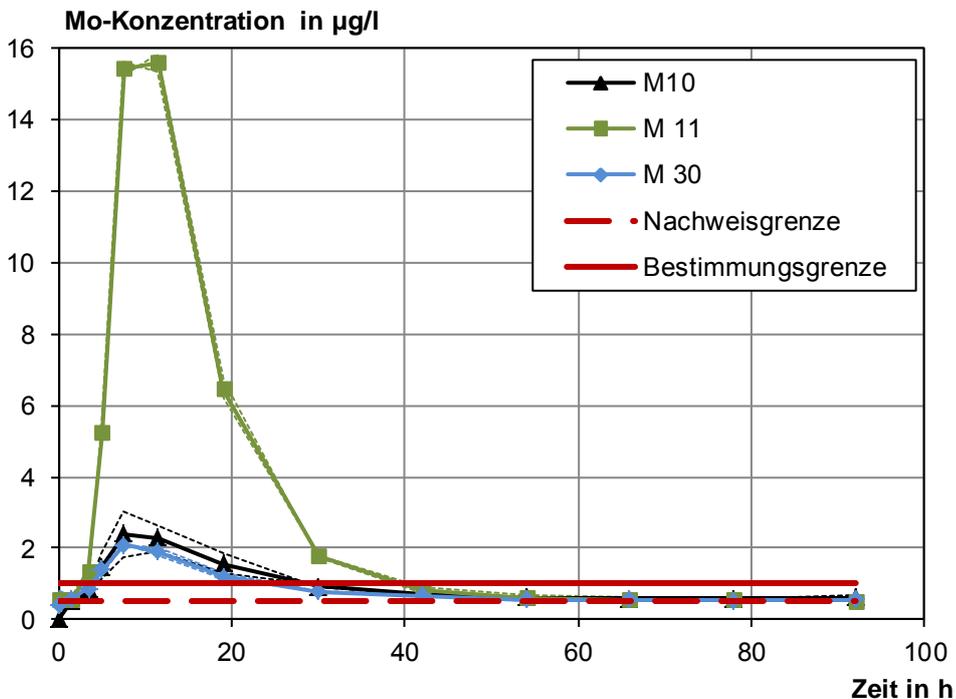


**Bild 82:** Verlauf der Bariumkonzentrationen der Eluate des dynamischen Versuchs



**Bild 83:** Verlauf der Chromkonzentrationen der Eluate des dynamischen Versuchs

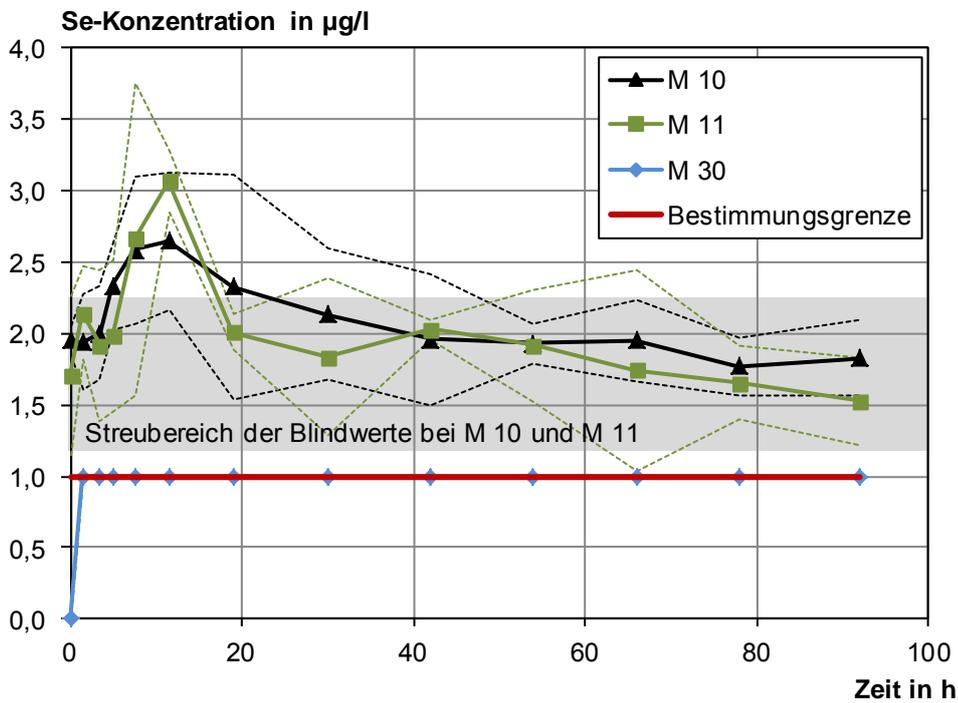
Wie bereits im Frischbetonstandtest beobachtet wird Molybdän aus dem flugaschehaltigen Beton verstärkt freigesetzt (s. Bild 84). Die Maximalkonzentration trat meist im 4. Eluat auf.



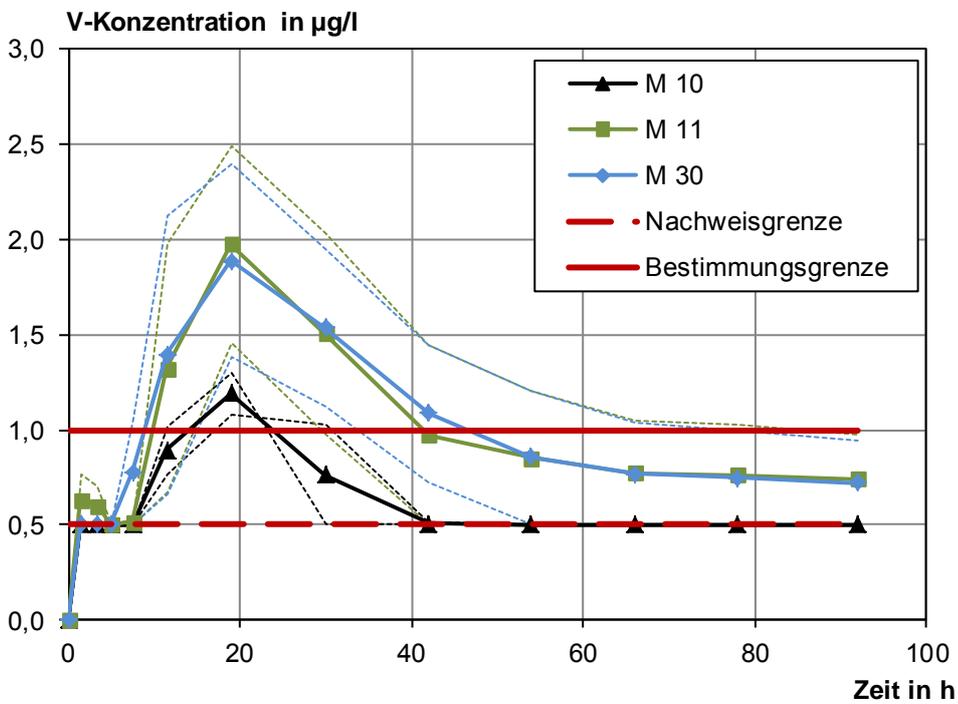
**Bild 84:** Verlauf der Molybdänkonzentrationen der Eluate des dynamischen Versuchs

Selen wird aus den Betonen M 10 und M 11 freigesetzt, der Konzentrationsanstieg ist jedoch sehr gering und die Streuungen der Hintergrundkonzentration vergleichsweise hoch (s. Bild 85). Die Maximalkonzentration wurde im 5. Eluat gemessen, d. h. bei diesem Parameter tritt eine leichte Retardierung auf.

Die Vanadiumkonzentrationen sind ebenfalls sehr niedrig, die Bestimmungsgrenze wurde nur in wenigen Eluaten überschritten (s. Bild 86). Das Maximum liegt bei 20 h (6. Eluat). Dies ist wahrscheinlich auf eine Retardierung zurückzuführen. Die Bilanzierung erfolgt auf Basis von Konzentrationen zwischen Bestimmungs- und Nachweisgrenze. Die Ergebnisse sind entsprechend unsicher.



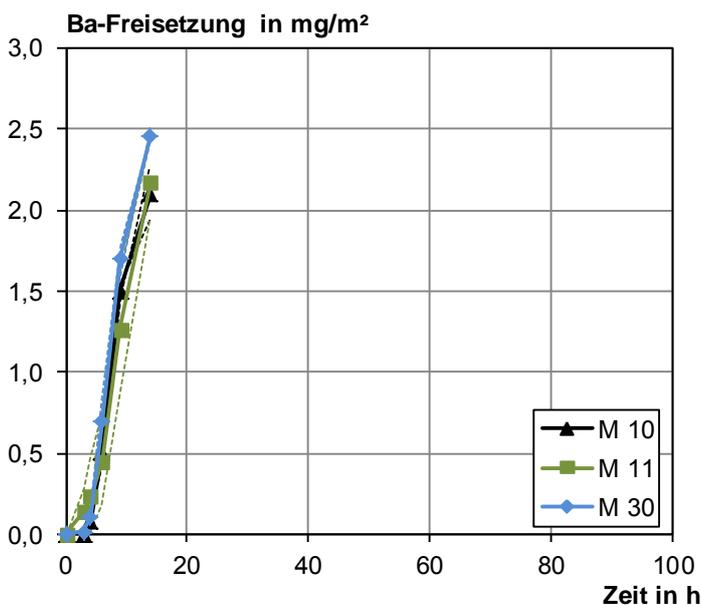
**Bild 85:** Verlauf der Selenkonzentrationen der Eluate des dynamischen Versuchs



**Bild 86:** Verlauf der Vanadiumkonzentrationen der Eluate des dynamischen Versuchs

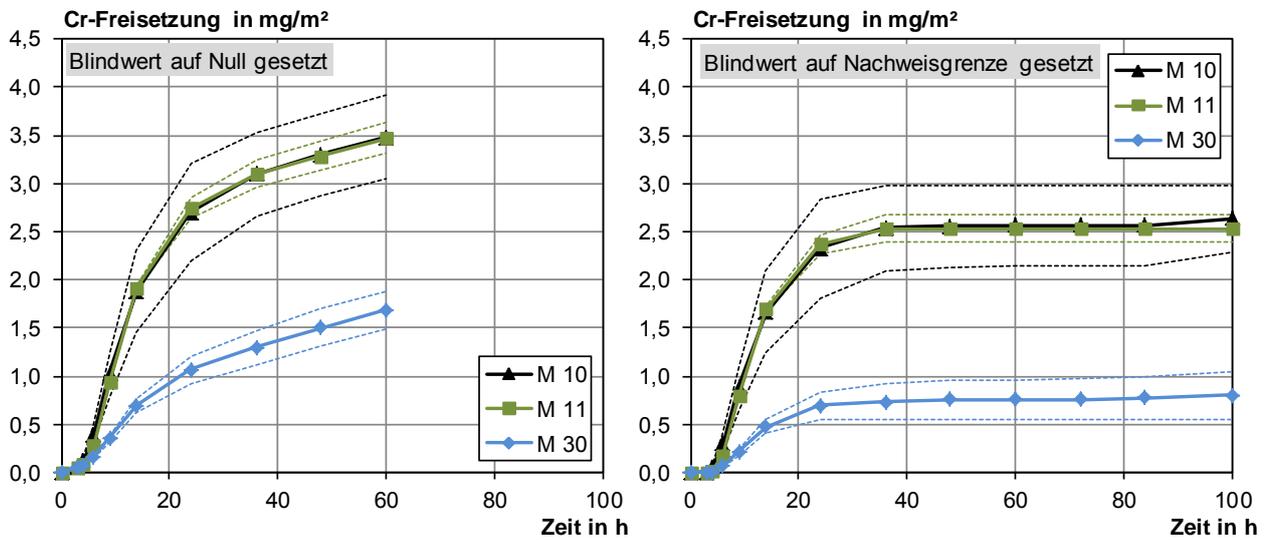
In den folgenden Bildern sind die Freisetzungverläufe für Barium, Chrom, Molybdän, Selen und Vanadium dargestellt. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, wurden dabei die Hintergrundkonzentrationen im Leitungswasser berücksichtigt. Für Chrom und Vanadium wurden bei den sechs Blindproben keine nachweisbaren Konzentrationen gefunden. Für Molybdän wurden bei M 10 Blindwerte unter der Nachweisgrenze festgestellt. In diesen Fällen wurden zwei Varianten gerechnet, zum einen mit einem Blindwert von Null, zum anderen mit einem Blindwert in Höhe der Nachweisgrenze. Bei Barium und Selen (M 10 und M11) lagen die Hintergrundwerte durchgehend über der Bestimmungsgrenze.

Für Barium ist in Bild 87 nur die Freisetzung zu Versuchsbeginn dargestellt. Berücksichtigt man den Konzentrationsabfall unter den Blindwert, so ist festzustellen, dass die zu Versuchsende die am Beton sorbierte Bariummenge größer ist als die Freisetzung.



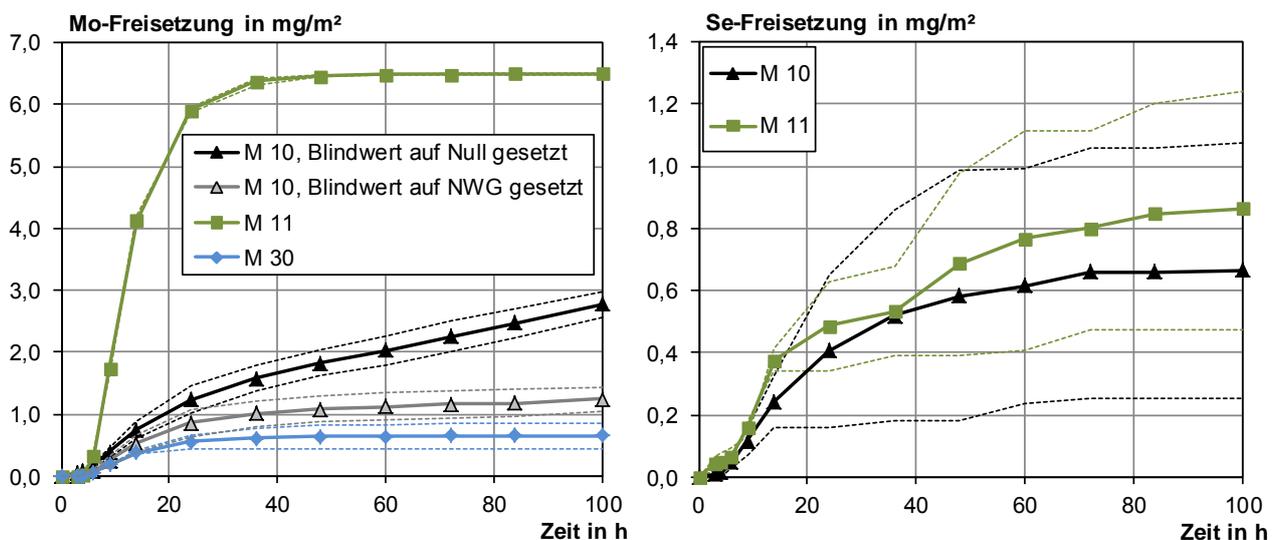
**Bild 87:** Kumulative Bariumfreisetzung im dynamischen Versuch

Die Chromfreisetzung ist in Bild 88 für die beiden Varianten dargestellt. Im linken Bild wurde die Auswertung nach 60 Stunden beendet, weil anschließend die Konzentrationen bei fast allen Eluaten unter der Nachweisgrenze lagen.

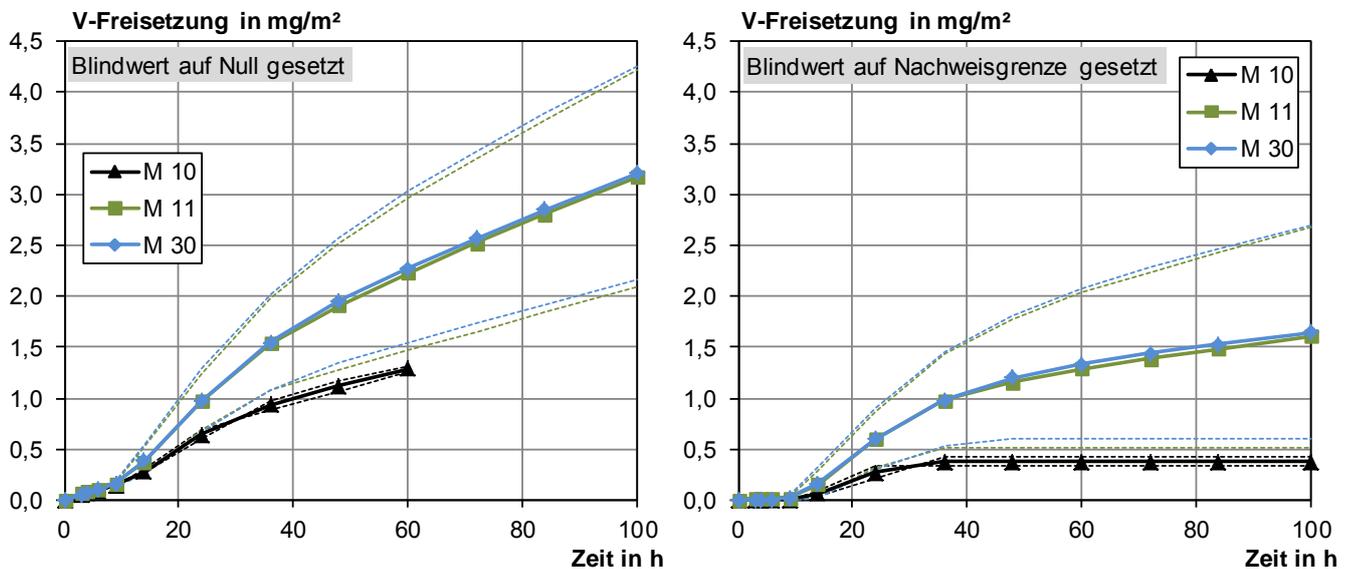


**Bild 88:** Kumulative Chromfreisetzung im dynamischen Versuch bei unterschiedlicher Festlegung des Blindwerts

Die Molybdän und Selenfreisetzungen sind in Bild 89 dargestellt, die Vanadiumfreisetzung in Bild 90. Es ist ersichtlich, dass die Festlegung des Blindwerts erheblichen Einfluss auf die berechnete Freisetzung hat. Für Molybdän, das in allen Auslaugversuchen eine sehr kurzfristige Freisetzung gezeigt hat, ist der Freisetzungsverlauf, der sich bei einem Blindwert von Null ergibt, nicht realistisch. Diese Variante wird daher im Folgenden nicht mehr betrachtet.



**Bild 89:** Kumulative Freisetzung von Molybdän und Selen im dynamischen Versuch



**Bild 90:** Kumulative Freisetzung von Vanadium im dynamischen Versuch bei unterschiedlicher Festlegung des Blindwerts

#### 4.6 Gegenüberstellung von dynamischem Versuch und Frischbetonstandtest

In /Bra07a/ wurde festgestellt, dass die Freisetzung im dynamischen Versuch für Parameter, Chrom und Molybdän, deren Löslichkeit mit sinkendem pH-Wert ansteigt, deutlich höher sein kann als im Frischbetonstandtest. Für die Chrom und Molybdän wurden Umrechnungsfaktoren ermittelt, die für die spezifischen Randbedingungen des Versuchs und den verwendeten Portlandzementbeton gelten. Für Sulfat können die Daten aus /Bra07a/ analog ausgewertet werden. In diesem Projekt sollten die Faktoren an dem Portlandzementbeton M 10 überprüft und die Übertragbarkeit auf andere Bindemittel anhand von M 11 und M 30 überprüft werden. Zu diesem Zweck werden die Freisetzungsverläufe des dynamischen Versuchs in diesem Abschnitt mit dem Frischbetonstandtest verglichen. Bei der Gegenüberstellung ist zu berücksichtigen, dass im dynamischen Versuch der Konzentrationsanstieg später auftritt, da zunächst der Transport durch das Sandbett erfolgt. Die zeitliche Verzögerung kann anhand der Fließgeschwindigkeit abgeschätzt werden (Advektion) (s. Gleichung (8)).

$$\Delta t = \frac{l_m}{v} \cdot 24 \quad (8)$$

- $\Delta t$ : Verzögerung des Konzentrationsanstiegs in h  
 $l_m$ : mittlere Fließstrecke,  $l_m = 0,4$  m (vgl. Bild 3)  
 $v$ : Fließgeschwindigkeit,  $v = 1$  m/d

$\Delta t$  ergibt sich zu 9,6 Stunden. In den folgenden Bildern wurden die Kurven des Frischbetonstandtests daher um 9,6 h verschoben. Da der dynamische Versuch über einen Zeitraum von 4,2 Tagen durchgeführt wurde, wurden die ersten zwei Wechsel des anschließenden Langzeitstandtests mit berücksichtigt (bis zum Alter von 4 d).

Bild 91 zeigt den Vergleich für Natrium und Kalium. In /Bra07a/ wurde für diese Parameter an einem Portlandzementbeton eine sehr ähnliche Relationen gefunden wie für M 10. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Kaliumfreisetzung in beiden Versuchen annähernd gleich ist. Bei dem flugasche- und dem hüttensandhaltigen Beton liegen die Freisetzungen im Frischbetonstandtest dagegen höher als im dynamischen Versuch. Hier liegt der Frischbetonstandtest auf der sicheren Seite.

Für Chlorid und Sulfat wurde beim Portlandzementbeton M 10 eine höhere Freisetzung im dynamischen Versuch gefunden als im Frischbetonstandtest (s. Bild 92). Die Umrechnungsfaktoren sind in den Bildern dargestellt ist. Bei dem flugasche- und dem hüttensandhaltigen Beton ergeben sich bis auf einen Fall (Chlorid bei M11) in beiden Versuchen die gleichen Freisetzungen.

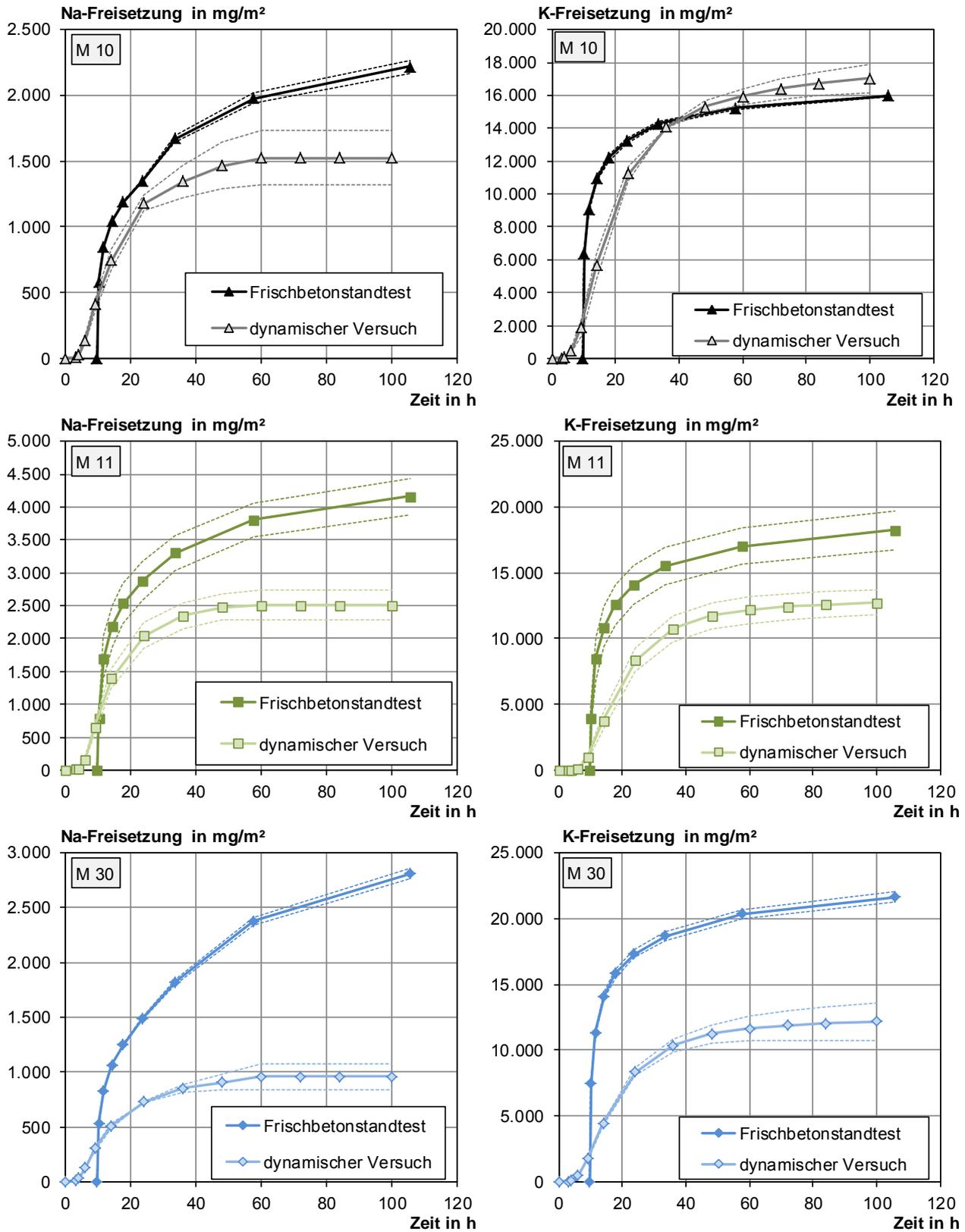


Bild 91: Vergleich der Natrium- und Kaliumfreisetzungen

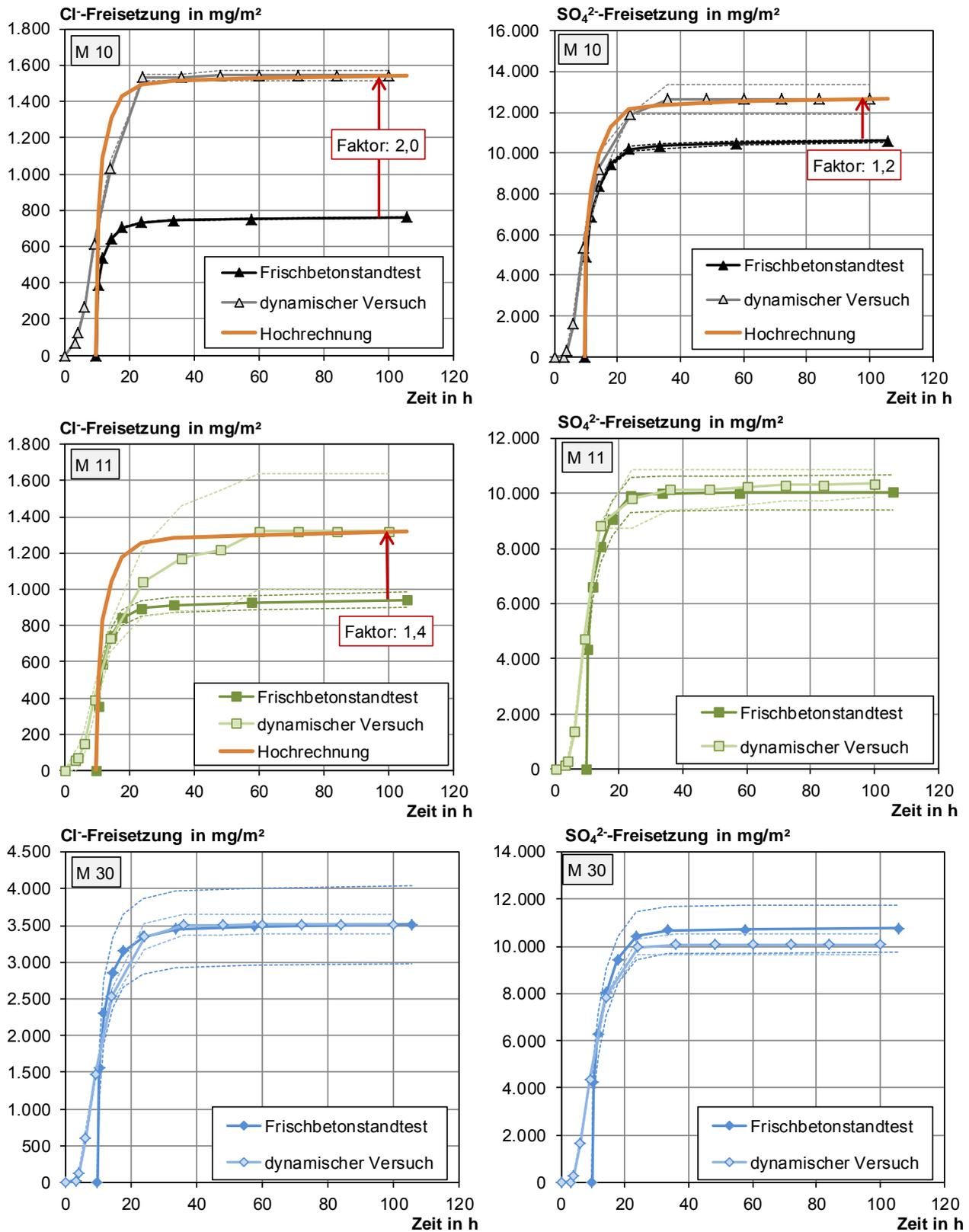


Bild 92: Vergleich der Chlorid- und Sulfatfreisetzungen

Bei Barium wird auf eine Gegenüberstellung verzichtet, da sich im dynamischen Versuch gezeigt hat, dass die Adsorption von Barium aus dem Leitungswasser höher ist als die Freisetzung. Bei realen Grundwässern wird voraussichtlich keine Bariumfreisetzung zu beobachten sein.

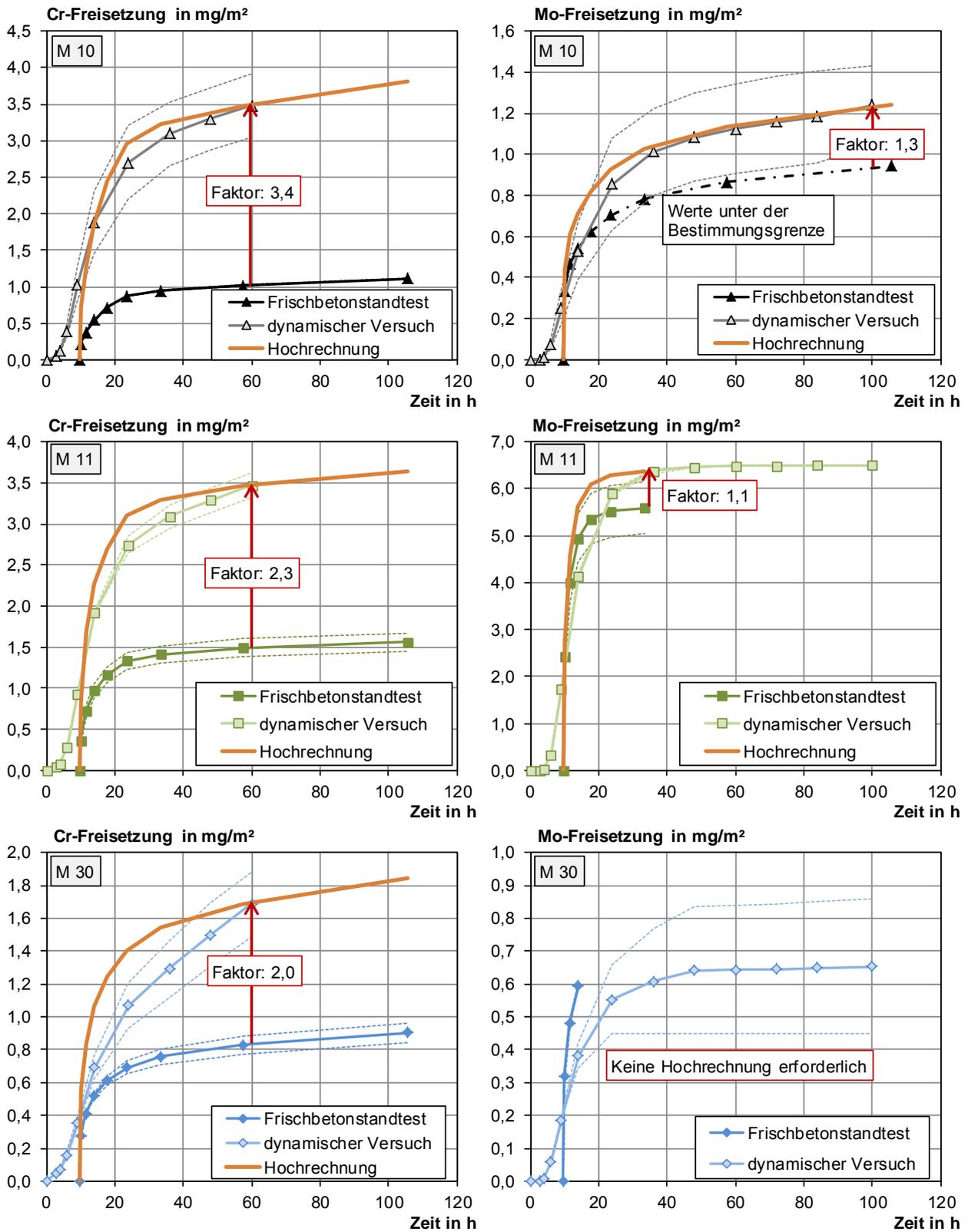
Für Chrom und Molybdän ist sind die Freisetzungen der beiden Auslaugversuche in Bild 93 gegenübergestellt, für Vanadium in Bild 94. Auf eine Auswertung von Selen wird verzichtet, da die Freisetzungen auch im dynamischen Versuch sehr gering waren und große Streuungen aufgrund der Hintergrundwerte auftraten (vgl. Bild 89). In den Bildern ist für Chrom und Vanadium nur die Hochrechnung für die maximale Freisetzung im dynamischen Versuch dargestellt, bei der der Blindwert zu Null angesetzt wurde. In der Zusammenstellung der Umrechnungsfaktoren in Tabelle 13 sind auch die Umrechnungsfaktoren für die Freisetzungen enthalten, die sich bei einem Blindwert in Höhe der Nachweisgrenze ergeben. Die Umrechnungsfaktoren, die sich für die beiden Berechnungsvarianten ergeben, differieren beträchtlich. Für den Beton M 10 ist für Sulfat und Chrom eine gute Übereinstimmung mit den Werten aus /Bra07a/ gegeben, für Molybdän wurde in diesem Projekt ein niedrigerer Umrechnungsfaktor gefunden.

**Tabelle 13:** Umrechnungsfaktoren zwischen der kumulativen Freisetzung im dynamischem Versuch und der kumulativen Freisetzung im Frischbetonstandtest

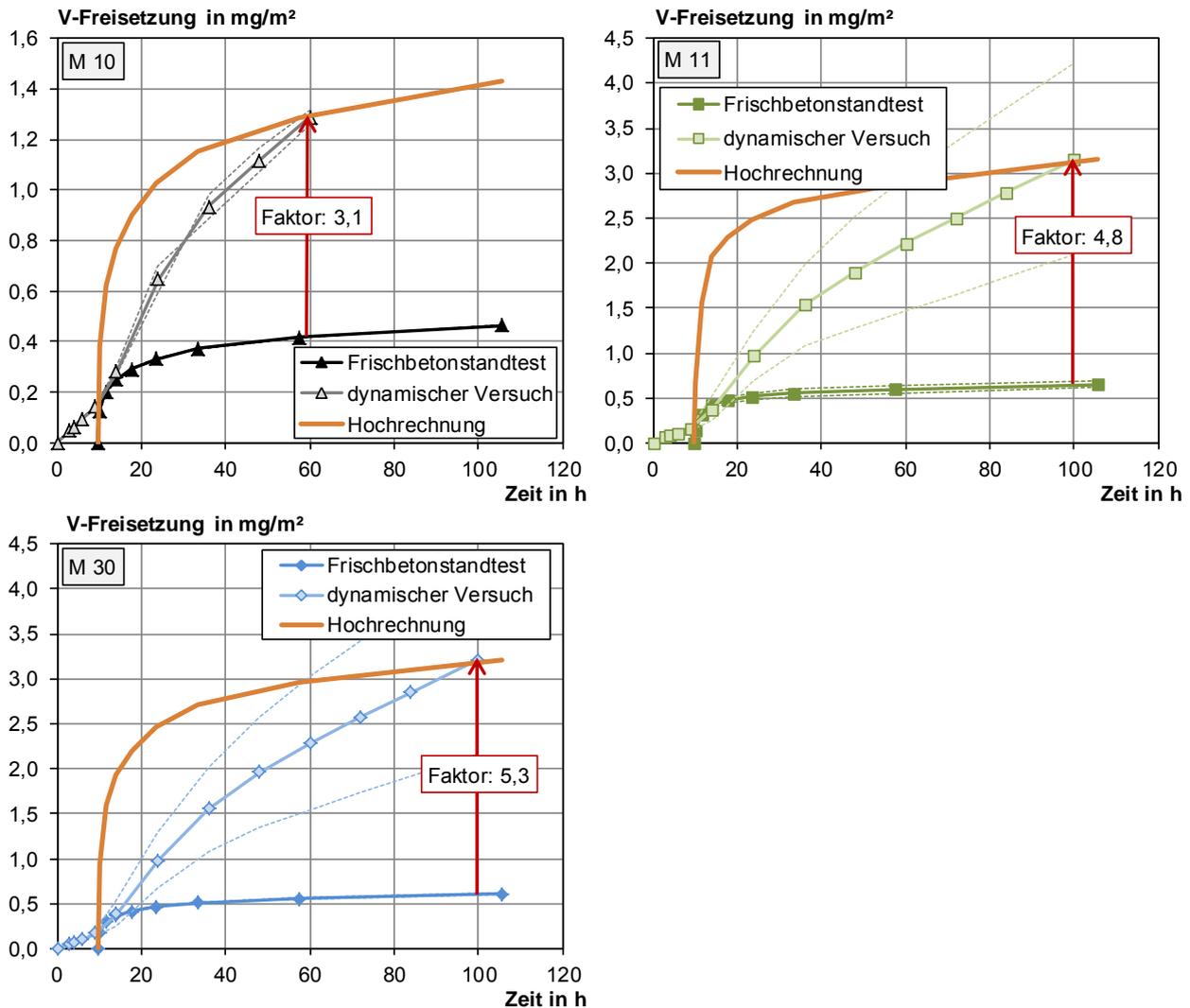
Parameter		M 10	M 11	M 30	/Bra07a/ (CEM I)
1		2	3	4	5
Chlorid		2,0	1,4	1*	-
Sulfat		1,2	1*	1*	1,4
Chrom	BW = 0 µg/l	3,4	2,3	2,0	3,3
	BW = 0,5 µg/l	2,5	1,6	1*	
Molybdän		1,3	1,1	1*	1,95
Vanadium	BW = 0 µg/l	3,1	4,8	5,3	-
	BW = 0,5 µg/l	1,6	2,5	2,7	

BW: festgelegter Blindwert zur Berechnung der kumulativen Freisetzung (Analyseergebnis: < 0,5 µg/l)

\*: Freisetzungen sind im Rahmen der Versuchsstreuungen als gleich zu betrachten



**Bild 93:** Vergleich der Chrom- und Molybdänfreisetzungen



**Bild 94:** Vergleich der Chrom- und Molybdändefreisetzungen

Die Zusammenstellung in Tabelle 13 zeigt, dass die Umrechnungsfaktoren vom Parameter und von der Betonzusammensetzung abhängig sind. Als grobe Tendenz zeichnet sich ab, dass die Umrechnungsfaktoren von Chlorid, Sulfat, Chrom und Molybdän mit sinkendem Klinkeranteil im Bindemittel abnehmen, während bei Vanadium eher der gegenläufige Trend zu beobachten ist. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die dynamischen Versuche an M 11 und M 30 für Vanadium sehr kleine Konzentrationen und eine sehr schlechte Reproduzierbarkeit gezeigt haben. Die Auswertung ist daher nicht zuverlässig.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Eine Betrachtung der Umweltverträglichkeit der Frischbetonphase im Rahmen von Zulassungsprüfungen ist für bestimmte Anwendungsfälle, wie z. B. Einsatz von Unterwasserbeton, vorgesehen. Im Rahmen des vom DAfStb geförderten Forschungsprojekts /Bra07a/ wurde ein Vorschlag zur Bewertung der Auslaugung während der Frischbetonphase erarbeitet. Als Standardversuch wurde ein Frischbetonstandtest vorgeschlagen. In diesem Versuch wird die Frischbetonoberfläche mit deionisiertem Wasser beaufschlagt, dass zu festgelegten Zeiten gewechselt wird. In /Bra07a/ wurde allerdings festgestellt, dass die Freisetzung bei Kontakt mit Leitungswasser gesättigtem Boden (dynamischer Versuch), deutlich höher sein kann als im Frischbetonstandtest. Im dynamischen Versuch wird der Beton auf einen von Leitungswasser durchströmten Sandboden aufgebracht. Daher wurde eine Hochrechnung der Frischbetonergebnisse durchgeführt, die auf Ergebnissen eines dynamischen Versuchs basierte. Im Anschluss wurden die Grundwasserkonzentrationen mit einem numerischen Transportprogramm ermittelt. Das entwickelte Bewertungskonzept basiert auf Untersuchungen an einem Portlandzementbeton und ist nur für Chrom und Molybdän anwendbar. Es existierte keine Datenbasis für andere genormte Betonausgangsstoffe. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, einerseits die in /Bra07a/ ermittelten Umrechnungsfaktoren zu überprüfen und ggf. auf weitere Spurenelemente zu erweitern und andererseits eine Datenbasis für genormte Betonausgangsstoffe zu erstellen. Des Weiteren sollte überprüft werden, ob eine Bewertung der Frischbetonphase erforderlich ist.

Für die Untersuchungen wurden ein Portlandzement, ein Portlandkalksteinzement und ein Hochofenzement ausgewählt. Da in der Praxis inzwischen ausschließlich chromatreduzierte Zemente zum Einsatz kommen, wurden auch für dieses Projekt chromatreduzierte Zemente verwendet. Der Portlandzement wurde zusätzlich mit zwei verschiedenen Flugaschen bzw. mit einem Silikastaub kombiniert, so dass insgesamt sechs Bindemittel bzw. Bindemittelkombinationen zu untersuchen waren. Die Ausgangsstoffe wiesen repräsentative Schwermetallgehalte auf, wobei die Flugaschen für die meisten Schwermetalle höhere Gehalte als die Zemente und der Silikastaub zeigten.

Bei den Auslaugversuchen wurden pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential und die Konzentrationen von Natrium, Kalium, Chlorid, Cyanid, Fluorid und Sulfat sowie Antimon, Arsen, Barium, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Thallium, Vanadium und Zink in den Eluaten bestimmt. Die Konzentrationen von Cyanid, Fluorid, Arsen, Cadmium und Quecksilber waren nicht nachweisbar. Antimon, Kobalt, Kupfer, Nickel, Thallium und Zink waren in den Standtests nur teilweise oder gar nicht messbar, die Gesamtfreisetzungen lagen jeweils deutlich unter  $1 \text{ mg/m}^2$ . Für diese Parameter wurde keine Auswertung des Freisetzungsverlaufs durchgeführt.

Mit den genannten Bindemittelkombinationen wurden sechs Betone hergestellt, die im Frischbetonstandtest ausgelaugt wurden. Dieser Versuch dauert 24 h. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurde der Frischbetonstandtest bis zum Alter von 57 Tagen durch einen angeschlossenen Langzeitstandtest verlängert. Zum Vergleich wurden Untersuchungen mit dem üblichen DAfStb-Langzeitstandtest durchgeführt, der im Betonalter von 56 Tagen beginnt. Ziel war es, die Relevanz der Frischbetonphase für die Umweltverträglichkeit des Baustoffs Beton festzustellen. Es sollte geprüft werden, ob eine separate Bewertung der Frischbetonphase erforderlich ist, oder ob eine Beurteilung anhand des DAfStb-Langzeitstandtests ausreicht. Für diese Untersuchungen wurden drei Betone ausgewählt. Es handelte sich um den Portlandzementbeton, den Hochofenzementbeton sowie eine Portlandzement-Flugasche-Kombination. Diese drei Betone wurden auch im dynamischen Versuch über einen Zeitraum von 100 h ausgelaugt.

Zur Beurteilung der Eignung des DAfStb-Langzeitstandtests sind in Tabelle 14 die Freisetzungen der quantifizierbaren Schwermetalle im Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest den Ergebnissen des DAfStb-Langzeitstandtests gegenübergestellt. Im ungünstigsten Fall (Chrom) war die Freisetzung um Faktor 10 höher als im DAfStb-Langzeitstandtest. Der DAfStb-Langzeitstandtest unterschätzt somit die Freisetzung. Ausnahmen sind Blei und Zink, wobei die Konzentrationen von Zink auf sehr niedrigem Niveau lagen (häufig unterhalb der Bestimmungsgrenze).

**Tabelle 14:** Kumulative Freisetzungen der Schwermetalle in den Standtests (Mittelwerte)

Parameter	M10		M11		M30		zul. $E_{56d}^{2)}$
	DAfStb	FS-LS <sup>1)</sup>	DAfStb	FS-LS <sup>1)</sup>	DAfStb	FS-LS <sup>1)</sup>	
-	mg/m <sup>2</sup>						mg/m <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
Barium	58,5	79,4	31,8	75,6	18,2	91,3	351
Blei	0,99 - 1,1	0 - 0,48	1,8	0,05 - 0,49	3,2	0 - 0,48	7,2
Chrom	0,2 - 0,3	2,3	0,38 - 0,42	2,8	0,17 - 0,29	2,1	7,2
Molybdän	0 - 0,48	0,46 - 1,3	0 - 0,48	5,5 - 6,1	0 - 0,48	0,59 - 1,3	36,1
Selen	0,16 - 0,3	0,47 - 1,2	0,36 - 0,43	1,6 - 1,9	0,46 - 0,51	1,2 - 1,4	7,2
Vanadium	0,42 - 0,54	3,6	3,0	5,3	1,6	5,1	4,1
Zink	0,05 - 0,49	0,47 - 0,73	0,07 - 0,51	0,25 - 0,6	0,5 - 0,74	0,07 - 0,51	59,8

1): Frischbetonstandtest mit anschließendem Langzeitstandtest, 57 tägige Auslaugung

2): nach /DIB11/ gilt zul.  $E_{56d}$  nur für DAfStb-Langzeitstandtest an Festbeton

Die Freisetzungen während des Frischbetonstandtests, des anschließenden Langzeitstandtests und des DAfStb-Langzeitstandtests wurden verglichen. Nur bei Blei wurden im DAfStb-Langzeitstandtest die höchsten Freisetzungen ermittelt. Für dieses Schwermetall ist die bisherige Bewertung der Festbetonphase ausreichend. Für Kalium, Chlorid, Sulfat, Molybdän und Selen werden bei allen Betonen die höchsten Freisetzungen im Frischbetonstandtest ermittelt. Molybdän wird nur während der Frischbetonphase in quantifizierbaren Konzentrationen freigesetzt. Die Freisetzungen von Chlorid und Sulfat während der Frischbetonphase waren ein bis drei Größenordnungen höher als die Freisetzungen während der Festbetonphase. Natrium, Barium, Chrom und Vanadium zeigen meist im angeschlossenen Langzeitstandtest die höchsten Freisetzungen. Für diese Parameter ist die Frischbetonphase und die erhöhte Auslaugung in jungem Alter relevant. Bei Vanadium wird im angeschlossenen Langzeitstandtest die zulässige Freisetzung nach /DIB11/ in drei Fällen überschritten. Dabei ist hervorzuheben, dass die zulässige Freisetzung einen diffusionskontrollierten Auslaugprozess voraussetzt. Bei Sulfat, Chrom und Vanadium ist diese Voraussetzung nicht gegeben. Die Auslaugraten wurden in doppeltlogarithmischem Maßstab über der Zeit aufgetragen. Nach dem Diffusionsmodell aus /DIB11/ sollte sich in dieser Darstellung eine Gerade mit einer Steigung von -0,5 ergeben. Im angeschlossenen Langzeitstandtest war für Sulfat und Vanadium keine Beschreibung durch eine abfallende Gerade möglich, da die Freisetzungen in den letzten Eluaten anstiegen. Bei Chrom ergaben sich Steigungen um -0,3. Die Auslaugung der drei Stoffe wurde maßgeblich von pH-Wert bestimmt. Dieser lag in den letzten Eluaten unterhalb der Stabilitätsgrenze von Ettringit, so dass die Sulfatfreisetzung anstieg. Da Chrom mit hoher Wahrscheinlichkeit als

Chromat in Ettringit eingebunden wird, wirkt sich die Ettringitzersetzung auch für dieses Schwermetall aus. Vanadium zeigte bei den abnehmenden pH-Werten der letzten Elutionsschritte des angeschlossenen Langzeitstandtests einen besonders ausgeprägten Anstieg der Löslichkeit. Im Extremfall betrug die Konzentration im letzten Eluat 41 µg/l, während im ersten < 0,5 µg/l festgestellt worden waren. Im DAfStb-Langzeitstandtest waren die pH-Werte höher, so dass die Beeinflussung des Auslaugverhaltens etwas geringer war, dennoch ist auch in diesem Versuch das Diffusionsmodell aus /DIB11/ für Sulfat, Chrom und Vanadium nicht anwendbar.

Vergleicht man die verschiedenen Bindemittelkombinationen, so ist festzustellen, dass die flugaschhaltigen Betone trotz höherer Schwermetallgehalte für die meisten Parameter keine erhöhten Freisetzungen zeigen. Lediglich bei Molybdän und in geringerem Maße bei Chrom und Vanadium sowie beim aus Umweltgesichtspunkten irrelevanten Parameter Natrium wird eine höhere Auslaugung festgestellt. Der Beton mit Silikastaub weist eine marginal höhere Freisetzung an Blei, Kupfer und Nickel auf. Die Auslaugung der Alkalien, von Chlorid, Sulfat und Barium verringert sich. Beim Hochofenzementbeton sind die Chlorid- und die Vanadium Freisetzung tendenziell erhöht.

Im dynamischen Versuch wurden die Freisetzungen von Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat, Barium, Chrom, Molybdän, Selen und Vanadium ausgewertet. Die übrigen Parameter waren entweder nicht nachweisbar oder die Konzentrationen lagen im Bereich der Hintergrundkonzentrationen. Bei Barium sinken die Konzentrationen nach der anfänglichen Freisetzung unter das Niveau der Hintergrundwerte ab, d. h. es tritt eine Sorption am Beton auf. Über die gesamte Versuchslaufzeit ist die Sorption höher als die Freisetzung. Bei realen Grundwässern wird voraussichtlich keine Bariumfreisetzung zu beobachten sein. Im dynamischen Versuch stellen sich niedrigere pH-Werte ein als im Frischbetonstandtest, daher waren die Freisetzungen von Sulfat, Molybdän, Chrom und Vanadium erhöht. Der in /Bra07a/ abgeleiteten Umrechnungsfaktor für Chrom ist für den hier untersuchten Portlandzementbeton anwendbar, für die anderen Bindemittel liegen die Faktoren niedriger. Das vorgeschlagene Bewertungskonzept liegt damit auf der sicheren Seite. Auch bei Molybdän waren die Umrechnungsfaktoren geringer als in /Bra07a/.

## 6 LITERATUR

- /Bra03/ Brameshuber, W. ; Vollpracht, A.: Prüfverfahren und Entwicklung von Prüfkriterien zur Bewertung der Auslaugung umweltrelevanter Stoffe aus Frischbeton. Aachen : Institut für Bauforschung, 2003. - Forschungsbericht Nr. F 817
- /Bra05/ Brameshuber, W. ; Vollpracht, A.: Prüfverfahren und Entwicklung von Prüfkriterien zur Bewertung der Auslaugung umweltrelevanter Stoffe aus Frischbeton – Fortsetzungsprojekt. Aachen : Institut für Bauforschung, 2005. – Forschungsbericht Nr. F 817/1
- /Bra06/ Brameshuber, W. ; Vollpracht, A.: Effiziente Sicherstellung der Umweltverträglichkeit von Beton - Teilprojekt B2 im DAfStb-/BMBF-Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ (Phase 1). Berlin: Beuth. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2007), Nr. 572, ISBN 978-3-410-65772-9, S. 223-273
- /Bra07a/ Brameshuber, W. ; Vollpracht, A.: Erarbeitung eines Bewertungskonzepts zur Auslaugung aus Frischbeton. Aachen : Institut für Bauforschung, 2007. – Forschungsbericht Nr. F 944
- /Bra07b/ Brameshuber, W. ; Vollpracht, A.: Strukturuntersuchungen an 10 Jahre alten Zementsteinproben. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2007. - Forschungsbericht Nr. F 928
- /Bra11/ Brameshuber, W. ; Nebel, H.: Untersuchungen zum Auslaugverhalten beregneter Putze und Mörtel. Aachen : Institut für Bauforschung, 2011. – Forschungsbericht Nr. F 7069
- /Bra12/ Brameshuber, W. ; Lin, X. ; Vollpracht, A.: Literaturrecherche zur Auslaugkinetik von zementgebundenen Baustoffen. Aachen : Institut für Bauforschung, 2012. – Forschungsbericht Nr. F 7091
- /DAf05/ DAfStb, TA Umwelt: DAfStb-Richtlinie „Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen“. – Ausgabe Mai 2005
- /DeW11/ De Weerd, K. ; Ben Haha, M. ; Saout Le, G. ; Kjellsen, K.O. ; Justnes, H. ; Lothenbach, B.: Hydration Mechanisms of Ternary Portland Cements Containing Limestone Powder and Fly Ash. In: Cement and Concrete Research 41 (2011), Nr. 3, S. 279-291
- /DIB09/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser – Teil I (Allgemeines Bewertungskonzept). DIBt-Mitteilung 40, S. 180, Juli 2009, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik

- /DIB11/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser – Teil II (Bewertungskonzepte für spezielle Bauprodukte), Kapitel „Betonausgangsstoffe und Beton“, September 2011, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik
- /DIN07/ DIN-Fachbericht CEN/TR 196-4: Prüfverfahren für Zement – Teil 4: Quantitative Bestimmung der Bestandteile. November 2007
- /Duc00/ Duchesne, J. ; Berube, M.A.: Long Term Effectiveness of Supplementary Cementing Materials Against ASR. Quebec : Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Beton, 2000. - In: Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Quebec, June 2000, (Berube, M.A. ; et al (Ed.)), S. 613-622
- /LAW04/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Unterausschuss „Geringfügigkeitsschwellen“: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser. Dez. 2004. Adresse: [www.lawa.de](http://www.lawa.de)
- /Sch04/ Schäfer, E.: Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins. TU Clausthal, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, 2004, Dissertation, Düsseldorf: Verlag Bau + Technik. - In: Schriftenreihe der Zementindustrie (2005), Nr. 69
- /Slo01/ Sloot van der, H. A. ; Hoede, D. ; Rietra, R.P.J.J. ; et al: Environmental Criteria for Cement Based Products: ECRICEM. Phase I: Ordinary Portland Cements. Petten : Energy Research Centre of the Netherlands, 2001. – Forschungsbericht Nr. ECN-C-01-069
- /Sta01/ Stark, J. ; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton : Der Baustoff als Werkstoff. Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser, 2001, ISBN 3-7643-6344-4
- /VDZ01/ Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Spurenelemente in deutschen Normzementen 2001. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2001
- /Vol12/ Vollpracht, A.: Einbindung von Schwermetallen in Portlandzementstein. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (2012), Nr. 18; ISBN 3-8630-635-2, Zugl.: Aachen, Technische Hochschule, Dissertation

**Tabelle A1:** Chemische Zusammensetzung der Betonausgangsstoffe – Hauptbestandteile bezogen auf die getrocknete Probe

Bestandteil	Z1	Z2	Z3	FA1	FA2	SF	
	M.-%						
1	2	3	4	5	6	7	
Glühverlust, Atmosphäre	2,21	3,87	0,64	4,19	3,23	–	
Glühverlust, Schutzgas	–	–	4,11	–	–	–	
Gesamtschwefel als SO <sub>3</sub> (CSA)	3,07	3,17	4,13	1,15	1,06	0,16	
Sulfat als SO <sub>3</sub> , gravimetrisch	–	–	2,50	–	–	–	
Gesamtkohlenstoff	als CO <sub>2</sub>	1,54	2,85	1,43	8,92	6,91	–
	als C	0,42	0,78	0,39	2,43	1,89	–
Cl <sup>-</sup>	0,005	0,048	0,046	0,014	0,025	0,068	
MgO	1,67	1,64	3,61	2,09	2,03	–	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,75	5,96	8,22	22,80	22,84	–	
SiO <sub>2</sub>	20,4	20,6	26,4	52,1	52,1	–	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,01	0,25	0,31	0,09	–	
CaO	63,3	61,1	53,0	2,42	5,03	–	
TiO <sub>2</sub>	0,25	0,26	0,92	1,04	1,04	–	
MnO	0,07	0,07	0,17	0,09	0,14	–	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,57	2,45	1,51	9,40	8,34	–	
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,18	0,28	1,13	0,68	–	
K <sub>2</sub> O	1,07	0,89	0,81	1,84	2,96	–	
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent	0,80	0,77	0,82	2,34	2,63	–	

FA: Flugasche, SF: Silikastaub

–: nicht bestimmt

**Tabelle A2:** Bestandteile der Zemente nach /DIN07/

Bestandteil	CEM I 42,5 R (Z1)	CEM II/A-LL 32,5 R (Z2)	CEM III/A 32,5 N (Z3)
	M.-%		
1	2	3	4
Klinker	92,0	86,1	48,7
Hüttensand	0	0	41,8
Kalkstein	3,08	5,70	2,86
Kieselsäurehaltiger Füller	0	3,15	2,70
Erstarrungsregler	4,91	5,07	3,99

**Tabelle A3:** Chemische Zusammensetzung der Betonausgangsstoffe - Spurenelemente nach Königswasseraufschluss

Parameter	Z1	Z2	Z3	FA1	FA2	SF
-	mg/kg					
1	2	3	4	5	6	7
Antimon	4,22	4,67	2,39	101	69,1	29,9
Arsen	4,30	4,57	3,43	49,3	63,0	18,8
Barium	198	172	317	505	768	7
Blei	16,6	16,4	11,6	51,9	120	27,2
Cadmium	0,10	0,57	0,56	1,28	1,34	0,421
Chrom	40,8	41,2	33,5	114	147	1,89
Kobalt	5,66	5,10	4,87	55,7	45,1	0,168
Kupfer	76,6	73,6	45	152	99,6	7,63
Molybdän	1,75	1,64	1,97	189	166	4,48
Nickel	16,6	16,4	9,12	157	104	0,947
Quecksilber	0,020	0,031	0,044	0,40	0,52	0,33
Selen	2,33	2,31	4,85	15,2	13,5	1,58
Thallium	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,494
Vanadium	47,7	51,4	34,5	244	156	0,175
Zink	316	373	284	150	243	185

**Tabelle A4:** Wasseranspruch und Erstarrungsverhalten unter Berücksichtigung der Zusatzstoffe

Mischungen	Wasseranspruch	Erstarrungsbeginn
	M.-%	h:min
1	2	3
M 10 (Z1)	29,5	03:05
M 20 (Z2)	26,4	03:25
M 30 (Z3)	30,3	05:05
M 11 (Z1-FA1)	29,2	04:25
M 12 (Z1-FA2)	28,4	03:45
M 13 (Z1-SF)	31,1	03:10

Tabelle A5: Eluatkonzentrationen des Frischbetonstandtests an M 10

Parameter	Einheit	Eluate											
		1 (0,5 h)		2 (2 h)		3 (4 h)		4 (8 h)		5 (14 h)		6 (24 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	11,45	11,48	11,40	11,44	11,50	11,55	11,49	11,50	11,62	11,59	11,71	11,67
Redox-potential	mV	151	160	181	189	195	195	237	181	139	197	211	215
Leitfähigkeit	µS/cm	760	761	550	565	654	662	758	650	983	952	1108	1106
Natrium	mg/l	7,3	7,3	3,3	3,3	2,4	2,4	1,8	1,9	2,0	2,1	3,8	4,2
Kalium		81,7	78,2	33,4	33,4	24,2	23,2	15,2	15,1	13,0	13,5	12,2	13,4
Chlorid		4,8	4,8	1,9	1,9	1,4	1,3	0,7	0,8	0,3	0,4	0,1	0,2
Sulfat		62,6	60,3	24,1	24,9	18,7	18,2	13,9	13,0	9,5	9,5	2,0	2,0
Fluorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cyanid		µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	8	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Antimon	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Arsen		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Barium		25,0	27,5	18,7	19,3	21,7	21,4	26,3	25,8	61,7	58,2	263	254
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom		2,63	2,70	1,99	1,99	2,10	2,15	2,14	2,21	1,90	1,89	0,94	0,93
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kupfer		1,01	< 0,5	0,85	< 0,5	0,89	< 0,5	0,74	< 0,5	0,67	< 0,5	0,70	< 0,5
Molybdän		4,21	4,17	1,61	1,59	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Nickel		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Quecksilber		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Selen		2,24	2,62	1,78	1,91	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Thallium		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Vanadium		1,56	1,56	1,01	0,91	0,59	0,59	0,51	0,57	0,50	0,52	< 0,5	0,52
Zink		1,85	< 0,5	1,27	< 0,5	1,36	1,15	1,09	0,89	1,03	0,54	1,06	0,95

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A6: Eluatkonzentrationen des anschließenden Langzeitstandtests an M 10

Parameter	Einheit	Eluate												
		7 (2 d)		8 (4 d)		9 (8 d)		10 (17 d)		11 (33 d)		12 (57 d)		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	11,77	11,79	11,79	11,80	11,62	11,73	11,74	11,68	11,08	11,05	9,98	10,29	
Redox-potential	mV	160	206	222	204	208	219	209	210	251	254	327	315	
Leitfähigkeit	µS/cm	1435	1429	1469	1465	1193	1086	1080	959	735	722	196	183	
Natrium	mg/l	3,6	4,0	2,9	3,1	2,6	2,9	3,5	3,7	4,5	4,6	4,9	5,4	
Kalium		11,2	12,6	9,0	9,8	9,0	9,7	14,2	15,4	19,3	20,9	23,6	26,7	
Chlorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	0,3	0,1	0,2
Sulfat		1,5	2,1	1,0	1,5	0,7	0,6	0,4	0,5	3,0	3,3	13,6	9,0	
Fluorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cyanid		µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Antimon	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1,86	< 1	
Arsen		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Barium		230	226	130	138	87,6	86,2	75,4	70,5	50,4	49,0	9,9	15,1	
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom		0,94	0,90	1,23	1,17	1,58	1,46	2,20	2,10	4,25	4,50	8,19	6,48	
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kupfer		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,96	0,96	1,22	1,46
Molybdän		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Nickel		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,50	0,60
Quecksilber		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Selen		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1,48	1,64	< 1	< 1
Thallium		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Vanadium		0,55	0,56	0,59	0,58	0,84	0,83	2,47	2,52	8,89	9,97	31,6	21,6	
Zink		0,53	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A7: Eluatkonzentrationen des Frischbetonstandtests an M 11

Parameter	Einheit	Eluate											
		1 (0,5 h)		2 (2 h)		3 (4 h)		4 (8 h)		5 (14 h)		6 (24 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	11,37	11,46	11,50	11,61	11,35	11,30	11,27	11,26	11,32	11,34	11,43	11,42
Redox-potential	mV	187	188	180	175	209	206	202	210	215	221	219	218
Leitfähigkeit	µS/cm	652	751	720	915	635	673	676	693	891	914	1005	1064
Natrium	mg/l	11,9	8,0	13,5	9,1	5,8	6,2	4,3	4,6	4,2	4,4	4,9	5,6
Kalium		59,0	39,9	66,8	45,2	29,2	31,3	20,9	21,7	18,9	19,6	17,0	18,4
Chlorid		4,2	4,8	2,7	3,1	1,9	1,9	1,2	1,3	0,7	0,6	0,2	0,3
Sulfat		50,2	58,5	25,9	30,9	17,0	19,0	12,4	13,3	10,6	10,5	1,0	0,8
Fluorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cyanid		µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Antimon	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Arsen		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Barium		20,1	24,6	17,5	22,9	17,1	17,3	18,8	19,5	34,0	48,7	167	269
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	<b>5,83</b>	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom		4,17	4,98	3,85	5,09	3,00	3,19	2,29	2,42	2,01	2,27	0,99	1,04
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,51
Kupfer		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Molybdän		27,07	33,66	17,69	21,82	10,68	12,61	4,82	5,64	1,91	2,01	< 1	< 1
Nickel		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Quecksilber		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Selen		4,57	4,65	3,63	2,83	2,85	3,01	2,86	2,67	2,10	< 1	1,87	< 1
Thallium		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Vanadium		1,69	1,83	1,86	2,68	1,37	1,32	0,52	0,58	0,51	0,50	< 0,5	< 0,5
Zink		< 0,5	0,58	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,53	0,67	< 0,5	2,65

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

**fettgedruckt:** ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A8: Eluatkonzentrationen des anschließenden Langzeitstandtests an M 11

Parameter	Einheit	Eluate												
		7 (2 d)		8 (4 d)		9 (8 d)		10 (17 d)		11 (33 d)		12 (57 d)		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	11,56	11,54	11,48	11,55	11,54	11,59	11,09	11,19	10,31	10,42	9,10	9,42	
Redox-potential	mV	202	205	231	225	226	226	276	276	326	333	392	373	
Leitfähigkeit	µS/cm	1213	1317	1170	1334	951	1120	349	504	218	245	171	168	
Natrium	mg/l	6,2	6,4	4,6	4,3	4,9	5,2	7,4	7,9	9,6	10,2	12,8	13,0	
Kalium		18,5	19,2	15,7	14,2	15,3	16,1	25,7	27,3	33,4	35,3	35,8	37,2	
Chlorid		0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	
Sulfat		0,2	0,2	0,3	0,3	0,7	0,4	1,3	1,2	2,7	2,1	15,3	14,9	
Fluorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Cyanid	µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	
Antimon	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2,74	1,81	
Arsen		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
Barium		211	317	139	150	91,6	108	56,2	73,4	27,5	31,2	8,2	6,0	
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,67	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Chrom		0,94	1,05	0,94	0,86	1,30	1,11	2,20	1,59	6,86	4,59	7,32	6,03	
Kobalt		< 0,5	0,54	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Kupfer		< 0,5	< 0,5	1,09	1,15	1,02	1,09	0,78	0,91	0,56	0,61	1,07	< 0,5	
Molybdän		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
Nickel		< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,88	< 0,5	0,81	< 0,5	0,59	< 0,5	< 0,5	0,53	< 0,5	
Quecksilber		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Selen		1,23	< 1	1,48	1,09	1,37	1,34	1,11	1,33	< 1	< 1	< 1	< 1	
Thallium		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
Vanadium		< 0,5	< 0,5	0,71	0,72	1,15	0,94	4,34	2,67	20,0	14,0	40,9	33,9	
Zink		< 0,5	0,71	0,97	< 0,5	< 0,5	0,70	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A9: Eluatkonzentrationen des Frischbetonstandtests an M 12

Parameter	Einheit	Eluate											
		1 (0,5 h)		2 (2 h)		3 (4 h)		4 (8 h)		5 (14 h)		6 (24 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	11,38	11,36	11,52	11,53	11,23	11,30	11,23	11,30	11,32	11,34	11,42	11,47
Redox-potential	mV	185	199	162	170	190	170	211	185	217	212	230	216
Leitfähigkeit	µS/cm	618	650	706	774	700	865	684	815	911	970	1017	1123
Natrium	mg/l	6,4	4,4	6,7	4,6	3,3	3,3	2,4	2,5	2,9	2,8	4,9	5,0
Kalium		60,6	38,8	63,2	41,8	30,0	30,3	19,9	19,6	19,0	18,4	18,2	17,6
Chlorid		4,7	5,0	3,0	3,3	2,2	2,2	1,3	1,3	0,7	0,7	0,3	0,2
Sulfat		54,9	43,0	22,6	24,4	17,3	17,7	11,3	12,4	7,4	7,9	0,6	0,8
Fluorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cyanid		µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Antimon	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Arsen		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Barium		25,5	26,2	23,0	24,1	23,6	27,7	25,0	30,1	51,6	54,7	272	289
Blei		0,68	0,56	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom		6,34	6,37	5,12	5,49	4,08	4,80	2,79	3,93	2,48	2,60	1,09	1,13
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,51
Kupfer		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Molybdän		15,5	16,4	10,9	12,6	8,07	8,24	3,44	3,91	1,63	1,67	< 1	< 1
Nickel		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Quecksilber		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Selen		3,75	3,75	2,23	2,28	2,00	1,21	1,92	1,16	< 1	< 1	< 1	< 1
Thallium		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Vanadium		1,63	1,48	2,46	2,06	1,83	2,33	0,54	2,76	0,52	0,87	< 0,5	0,57
Zink		0,62	0,68	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,50	< 0,5	< 0,5	0,66	1,19	0,68	1,06

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A10: Eluatkonzentrationen des anschließenden Langzeitstandtests an M 12

Parameter	Einheit	Eluate											
		7 (2 d)		8 (4 d)		9 (8 d)		10 (17 d)		11 (33 d)		12 (57 d)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	11,51	11,57	11,49	11,54	11,59	11,62	11,16	11,36	10,17	10,50	9,13	9,63
Redox-potential	mV	219	217	222	223	226	225	303	291	343	326	382	366
Leitfähigkeit	µS/cm	1262	1431	1299	1417	1097	1112	730	643	230	310	173	166
Natrium	mg/l	5,2	5,0	4,8	5,4	4,2	4,1	6,0	5,5	6,6	6,3	8,2	7,9
Kalium		18,6	17,3	14,5	15,4	16,2	14,8	27,0	25,0	36,6	34,3	42,3	40,7
Chlorid		0,2	0,2	0,4	0,3	0,1	< 0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
Sulfat		0,2	0,6	0,3	0,4	0,6	0,2	1,4	1,3	2,7	2,1	16,1	15,9
Fluorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cyanid		µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Antimon	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2,08	< 1
Arsen		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Barium		270	310	150	153	105	89,0	63,9	81,0	30,8	47,2	6,4	7,0
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom		1,09	1,26	1,09	1,07	1,41	< 0,5	2,16	< 0,5	6,40	4,98	6,48	6,45
Kobalt		0,51	0,52	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kupfer		< 0,5	< 0,5	1,01	1,09	1,16	< 0,5	0,88	< 0,5	1,12	1,06	< 0,5	0,73
Molybdän		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Nickel		< 0,5	< 0,5	0,91	0,88	0,80	< 0,5	0,54	< 0,5	0,53	< 0,5	< 0,5	0,54
Quecksilber		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Selen		< 1	< 1	1,49	< 1	1,05	< 1	1,32	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Thallium		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Vanadium		0,51	0,58	0,73	0,73	1,00	< 0,5	3,35	< 0,5	17,6	13,3	33,8	30,7
Zink		0,55	0,86	1,00	< 0,5	0,80	0,66	< 0,5	0,70	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A11: Eluatkonzentrationen des Frischbetonstandtests an M 13

Parameter	Einheit	Eluate												
		1 (0,5 h)		2 (2 h)		3 (4 h)		4 (8 h)		5 (14 h)		6 (24 h)		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	10,64	10,67	10,86	10,79	10,87	10,84	10,98	10,96	11,00	11,09	10,99	11,11	
Redox-potential	mV	281	315	250	256	239	266	243	254	254	259	249	258	
Leitfähigkeit	µS/cm	535	518	687	597	576	553	594	682	626	767	622	800	
Natrium	mg/l	3,6	3,5	2,6	2,9	1,4	1,9	1,7	2,0	2,6	3,1	2,3	2,6	
Kalium		38,8	36,4	24,7	27,8	12,7	14,2	11,6	12,7	9,5	10,4	8,0	8,4	
Chlorid		2,3	2,3	1,6	1,8	0,9	1,1	0,6	0,7	0,2	0,4	0,2	0,3	
Sulfat		26,4	35,5	17,9	18,2	10,0	11,8	4,0	4,5	0,6	0,7	0,4	0,4	
Fluorid		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyanid	µg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Arsen		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barium		22,0	22,3	27,5	20,7	21,7	20,1	30,8	33,6	123	134	102	103	
Blei		1,00	0,98	0,74	0,99	0,81	0,87	0,76	0,74	0,64	0,74	0,72	0,64	
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Chrom		4,40	4,74	3,32	3,35	1,97	2,20	1,40	1,62	0,91	0,96	0,91	0,89	
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Kupfer		1,76	2,01	1,56	1,75	1,43	1,64	1,31	1,57	1,25	1,49	1,30	1,57	
Molybdän		< 1,0	1,95	< 1,0	1,22	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Nickel		1,15	1,51	1,37	1,54	1,48	1,59	1,48	1,64	1,57	1,63	1,62	1,65	
Quecksilber		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Selen		2,74	2,85	2,89	2,55	2,17	1,98	2,11	2,04	1,52	1,33	< 1,0	1,60	
Thallium		1,10	1,39	1,58	1,21	1,17	1,07	< 1,0	1,00	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Vanadium		1,94	2,34	1,04	0,99	0,88	0,82	0,92	0,78	1,08	0,83	1,16	0,83	
Zink		1,53	1,45	3,41	1,94	1,81	1,82	1,21	1,36	0,75	0,86	0,83	1,03	

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

-: nicht bestimmt

Tabelle A12: Eluatkonzentrationen des anschließenden Langzeitstandtests an M 13

Parameter	Einheit	Eluate											
		7 (2 d)		8 (4 d)		9 (8 d)		10 (17 d)		11 (33 d)		12 (57 d)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	10,98	11,15	10,90	11,09	10,96	11,01	11,13	11,12	9,43	9,46	8,74	9,02
Redox-potential	mV	222	227	257	242	233	252	263	289	393	338	362	373
Leitfähigkeit	µS/cm	762	972	551	819	1675	1869	357	361	100	105	91	95
Natrium	mg/l	2,7	2,9	2,7	2,7	2,5	2,8	2,9	3,0	1,8	1,9	1,5	1,4
Kalium		10,1	10,0	9,3	9,4	10,4	10,3	13,3	13,1	8,3	8,4	5,5	5,6
Chlorid		0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2
Sulfat		0,4	0,3	0,7	0,5	1,1	1,3	1,6	2,1	8,6	5,2	12,1	11,0
Fluorid		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyanid	µg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Antimon	µg/l	2,12	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,07	< 1,0	1,14	1,73	1,72	1,81
Arsen		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barium		106	96,6	75,5	71,8	59,6	58,2	44,9	43,4	16,8	19,1	9,6	10,1
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,61	0,56	0,86	0,91	1,14	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom		1,14	1,01	1,47	1,18	2,27	2,03	3,22	3,39	3,91	3,99	3,97	4,65
Kobalt		0,53	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kupfer		1,54	1,66	1,37	1,61	1,32	1,65	1,20	1,64	0,72	0,73	0,53	0,56
Molybdän		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Nickel		2,35	1,77	1,62	1,81	1,44	1,73	1,43	1,81	0,98	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Quecksilber		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Selen		< 1,0	1,72	1,49	1,90	1,65	1,83	< 1,0	1,92	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Thallium		< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,08	< 1,0	1,08	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Vanadium		1,93	0,89	2,22	1,21	4,84	3,56	7,89	8,79	10,94	12,14	16,61	20,79
Zink		0,59	1,13	0,63	1,00	0,89	1,36	0,87	0,85	1,12	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

-: nicht bestimmt

Tabelle A13: Eluatkonzentrationen des Frischbetonstandtests an M 20

Parameter	Einheit	Eluate												
		1 (0,5 h)		2 (2 h)		3 (4 h)		4 (8 h)		5 (14 h)		6 (24 h)		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	11,43	11,42	11,32	11,32	11,43	11,43	11,26	11,30	11,37	11,33	11,46	11,46	
Redox-potential	mV	173	202	188	188	210	221	216	215	225	228	210	211	
Leitfähigkeit	µS/ cm	677	794	524	524	589	608	791	803	939	917	1165	1150	
Natrium	mg/l	5,3	6,8	2,7	2,7	2,4	2,7	2,1	2,4	2,6	2,5	5,0	4,7	
Kalium		73,6	94,7	32,7	32,7	26,4	33,0	23,2	25,0	19,6	19,5	21,3	20,0	
Chlorid		10,9	14,1	4,2	7,3	4,5	4,1	3,7	4,1	2,1	2,2	0,5	0,5	
Sulfat		62,2	60,5	19,7	27,8	14,6	16,2	13,2	13,7	6,9	8,3	0,7	0,4	
Fluorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cyanid		µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Antimon	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
Arsen		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Barium		20,1	21,6	18,3	14,7	17,6	13,7	22,9	18,5	42,6	30,8	169	129	
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom		2,59	3,13	2,05	2,35	2,04	1,93	2,38	2,21	1,70	1,73	0,81	0,87	
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kupfer		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Molybdän		3,06	4,40	1,20	1,70	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Nickel		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,50	< 0,5
Quecksilber		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Selen		1,95	< 1	1,34	3,31	1,30	2,89	< 1	2,13	< 1	2,04	< 1	1,67	< 1
Thallium		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Vanadium		1,88	2,00	1,44	2,16	0,96	0,92	0,74	0,54	0,52	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Zink		1,11	1,36	< 0,5	< 0,5	0,54	< 0,5	< 0,5	0,69	0,86	0,67	0,93	0,87	< 0,5

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A14: Eluatkonzentrationen des anschließenden Langzeitstandtests an M 20

Parameter	Einheit	Eluate												
		7 (2 d)		8 (4 d)		9 (8 d)		10 (17 d)		11 (33 d)		12 (57 d)		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	11,57	11,60	11,60	11,55	11,63	11,68	11,31	11,44	10,54	11,04	9,82	10,18	
Redox-potential	mV	218	219	218	222	226	212	270	358	329	300	328	305	
Leitfähigkeit	µS/cm	1523	1496	1517	1523	1246	1397	642	854	246	506	171	212	
Natrium	mg/l	5,2	4,8	4,1	3,9	3,8	3,7	4,9	4,6	5,6	5,5	7,7	7,8	
Kalium		21,4	19,7	15,6	14,7	14,3	13,8	22,6	21,2	30,5	29,1	40,7	39,4	
Chlorid		0,4	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	
Sulfat		0,2	0,2	0,4	0,3	0,6	0,5	1,4	1,3	2,1	2,0	8,7	3,6	
Fluorid		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cyanid		µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Antimon	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
Arsen		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
Barium		159	134	93,6	91,8	67,3	67,2	45,3	54,0	30,3	44,3	8,1	16,0	
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Chrom		0,96	0,99	1,10	1,12	1,38	1,47	1,85	1,94	4,17	3,72	5,60	5,54	
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Kupfer		< 0,5	< 0,5	0,95	0,95	0,96	1,03	0,93	0,95	< 0,5	0,75	1,49	0,77	
Molybdän		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
Nickel		0,59	< 0,5	0,93	0,93	0,85	0,87	0,61	0,73	< 0,5	0,60	< 0,5	0,51	
Quecksilber		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Selen		< 1	< 1	1,29	1,79	1,58	1,64	1,95	1,45	< 1	1,01	< 1	< 1	
Thallium		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
Vanadium		0,52	< 0,5	0,65	0,66	0,78	0,77	1,94	1,63	8,57	6,76	20,7	17,1	
Zink		0,99	1,12	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,76	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A15: Eluatkonzentrationen des Frischbetonstandtests an M 30

Parameter	Einheit	Eluate											
		1 (0,5 h)		2 (2 h)		3 (4 h)		4 (8 h)		5 (14 h)		6 (24 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	10,77	10,89	10,77	10,97	10,94	11,08	11,15	11,30	11,37	11,30	11,31	11,44
Redox-potential	mV	209	199	239	223	217	216	234	188	139	143	118	130
Leitfähigkeit	µS/cm	809	930	597	722	767	887	800	996	1044	1223	1294	1425
Natrium	mg/l	6,9	6,4	3,6	3,8	2,9	3,1	2,2	2,4	2,9	3,1	4,0	4,2
Kalium		<b>3,6</b>	93,3	46,4	50,2	33,4	35,7	20,7	22,7	18,6	18,8	16,6	17,2
Chlorid		23,9	14,9	10,5	8,5	7,3	6,2	4,1	3,6	2,7	2,2	1,4	1,2
Sulfat		63,3	42,7	27,3	24,0	22,5	21,5	17,0	17,5	12,9	12,4	3,1	3,0
Fluorid		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyanid	µg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Arsen		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barium		21,7	21,9	18,2	23,0	20,6	25,5	26,8	31,6	47,3	56,3	156	191
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom		3,62	3,25	1,47	1,92	1,18	1,57	0,98	1,27	0,87	1,10	0,75	0,93
Kobalt		0,59	0,55	0,55	0,57	0,59	0,62	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kupfer		1,34	1,40	1,06	1,23	0,90	0,96	0,74	0,86	0,72	1,14	0,66	1,00
Molybdän		4,22	3,80	1,94	2,08	1,36	1,46	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Nickel		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,67	< 0,5	0,61
Quecksilber		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Selen		2,07	2,53	2,07	1,81	1,65	1,74	1,82	1,08	1,31	1,65	1,87	1,19
Thallium		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Vanadium		2,44	1,95	1,42	1,67	0,86	0,76	0,64	0,63	0,55	0,68	0,51	0,67
Zink		< 0,5	1,16	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

**fettgedruckt:** ausreißerverdächtiger Wert, bei der Auswertung wurde der Wert der Parallelprobe gewählt

-: nicht bestimmt

Tabelle A16: Eluatkonzentrationen des anschließenden Langzeitstandtests an M 30

Parameter	Einheit	Eluate												
		7 (2 d)		8 (4 d)		9 (8 d)		10 (17 d)		11 (33 d)		12 (57 d)		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	11,46	11,50	11,36	11,37	11,11	11,17	11,31	11,31	9,55	10,02	8,38	8,52	
Redox-potential	mV	165	170	181	185	196	179	233	223	281	239	376	366	
Leitfähigkeit	µS/cm	1731	<b>3830</b>	1723	1730	1141	1210	541	627	121	166	136	133	
Natrium	mg/l	6,8	7,2	5,2	5,5	4,5	4,6	4,1	4,4	2,9	3,1	2,3	2,5	
Kalium		20,5	21,1	16,0	16,6	13,8	14,1	11,5	12,0	6,9	7,2	4,9	5,0	
Chlorid		0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	
Sulfat		<b>2,8</b>	0,5	0,4	0,6	1,1	1,4	2,7	3,1	8,2	5,6	30,9	30,6	
Fluorid		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyanid	µg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,30	1,20	1,70	1,63	2,07	2,05	
Arsen		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barium		318	352	262	274	147	151	57,1	62,1	18,6	22,8	9,8	12,1	
Blei		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom		0,82	0,99	0,89	1,00	1,08	1,36	3,26	3,59	5,37	6,51	4,04	5,03	
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kupfer		0,70	1,19	0,69	1,05	0,77	1,07	0,69	1,04	0,50	0,97	0,71	0,95	
Molybdän		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Nickel		< 0,5	0,64	< 0,5	0,56	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Quecksilber		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Selen		< 1,0	1,21	1,06	1,47	1,31	1,83	1,54	1,72	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Thallium		< 1,0	< 1,0	1,28	1,28	1,14	1,37	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Vanadium		0,50	0,64	0,51	0,67	0,97	1,65	8,95	9,12	19,69	20,3	26,2	26,3	
Zink		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

**fettgedruckt:** ausreißerverdächtiger Wert, bei der Auswertung wurde der Wert der Parallelprobe gewählt

-: nicht bestimmt

**Tabelle A17:** Kumulative Freisetzungen  $E_{24h}$  im Frischbetonstandtest (Mittelwert der Doppelbestimmungen)

Parameter	M 10 (CEM I)	M 20 (CEM II/A-LL)	M 30 (CEM III/A)	M 11 (mit FA1)	M 12 (mit FA2)	M 13 (CEM III/B)	
	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	
Natrium	1672	1676	1820	3300	1968	1208	
Kalium	14260	16868	18676	15516	15096	8608	
Chlorid	744	2325	3451	914	992	498	
Sulfat	9007	9618	10685	9868	8676	5213	
Fluorid	< 48	< 48	–	< 48	< 48	–	
Cyanid	< 0,96	< 0,96	–	< 0,96	< 0,96	–	
Antimon	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,48	
Arsen	< 0,48	< 0,48	n.b.	< 0,48	< 0,48	n.b.	
Barium	32,9	20,7	24,7	27,1	34,9	25,6	
Blei	< 0,24	< 0,24	< 0,24	< 0,24	< 0,25	0,39	
Cadmium	< 0,24	< 0,24	< 0,24	< 0,24	< 0,24	< 0,24	
Chrom	0,94	0,95	0,76	1,41	1,85	1,07	
Kobalt	< 0,24	< 0,24	< 0,26	< 0,24	< 0,24	< 0,24	
Kupfer	$E_{24h,min}$	≥ 0,19	≥ 0	0,48	≥ 0	≥ 0	0,75
	$E_{24h,max}$	< 0,31	< 0,24		< 0,24	< 0,24	
Molybdän	$E_{24h,min}$	≥ 0,46	≥ 0,41	≥ 0,59	≥ 5,52	≥ 3,29	≥ 0,13
	$E_{24h,max}$	< 0,78	< 0,73	< 0,83	< 5,6	< 3,37	< 0,53
Nickel	< 0,24	< 0,24	< 0,25	< 0,24	< 0,24	0,73	
Quecksilber	< 0,048	< 0,048	–	< 0,048	< 0,048	–	
Selen	$E_{24h,min}$	≥ 0,34	≥ 0,67	0,83	≥ 1,24	≥ 0,73	≥ 0,95
	$E_{24h,max}$	< 0,66	< 0,83		< 1,32	< 0,89	< 0,99
Thallium	$E_{24h,min}$	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0,34
	$E_{24h,max}$	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,54
Vanadium	$E_{24h,min}$	0,37	≥ 0,45	0,51	≥ 0,51	≥ 0,68	0,54
	$E_{24h,max}$		< 0,51		< 0,55	< 0,70	
Zink	$E_{24h,min}$	≥ 0,45	≥ 0,28	≥ 0,05	≥ 0,18	≥ 0,26	0,72
	$E_{24h,max}$	< 0,49	< 0,36	< 0,27	< 0,34	< 0,36	

Für Stoffe, die in einem Teil der Eluate nachgewiesen wurden, ist neben der maximalen Freisetzung  $E_{24h,max}$ , auch die minimale Freisetzung  $E_{24h,min}$  angegeben, bei der die nicht nachweisbaren Konzentrationen zu Null gesetzt werden

–: nicht bestimmt

**Tabelle A18:** Kumulative Freisetzungen  $E_{57d}$  des Frischbetonstandtests mit anschließendem Langzeitstandtest (Mittelwert der Doppelbestimmungen)

Parameter	M 10 (CEM I)	M 20 (CEM II/A-LL)	M 30 (CEM III/A)	M 11 (mit FA1)	M 12 (mit FA2)	M 13 (CEM III/B)	
	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	
Natrium	3.502	4.132	3.944	6.992	4.728	2.360	
Kalium	21.515	28.189	24.661	27.265	27.205	13.156	
Chlorid	807	2.448	3.601	988	1091	600	
Sulfat	10.057	10.279	14.190	11.268	10.159	7.004	
Fluorid	< 96	< 96	–	< 96	< 96	–	
Cyanid	< 1,92	< 1,92	–	< 1,92	< 1,92	–	
Anti- mon	$E_{57d,min}$	≥ 0	≥ 0	≥ 0,40	≥ 0,18	≥ 0	≥ 0,38
	$E_{57d,max}$	< 0,96	< 0,96	< 1,12	< 1,06	< 0,96	< 1,1
Arsen	< 0,96	< 0,96	–	< 0,96	< 0,96	–	
Barium	79,4	53,0	91,3	75,6	87,2	49,2	
Blei	$E_{57d,min}$	≥ 0	≥ 0	≥ 0,05	≥ 0,05	≥ 0,05	≥ 0,55
	$E_{57d,max}$	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,49	< 0,49	< 0,69
Cadmium	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,48	< 0,48	
Chrom	2,34	2,15	2,11	2,8	3,18	2,36	
Kobalt	$E_{57d,min}$	≥ 0	≥ 0	≥ 0,14	≥ 0,04	≥ 0,06	≥ 0,02
	$E_{57d,max}$	< 0,48	< 0,48	< 0,50	< 0,48	< 0,48	< 0,48
Kupfer	$E_{57d,min}$	≥ 0,38	≥ 0,35	0,89	≥ 0,33	≥ 0,28	1,33
	$E_{57d,max}$	< 0,66	< 0,65		< 0,63	< 0,62	
Molyb- dän	$E_{57d,min}$	≥ 0,46	≥ 0,41	≥ 0,59	≥ 5,52	≥ 3,29	≥ 0,13
	$E_{57d,max}$	< 1,26	< 1,21	< 1,31	< 6,08	< 3,85	< 1,01
Nickel	$E_{57d,min}$	≥ 0,04	≥ 0,30	≥ 0,10	≥ 0,18	≥ 0,19	≥ 1,33
	$E_{57d,max}$	< 0,48	< 0,56	< 0,50	< 0,54	< 0,53	< 1,39
Quecksilber	< 0,096	< 0,096	–	< 0,096	< 0,096	–	
Selen	$E_{57d,min}$	≥ 0,47	≥ 1,09	≥ 1,24	≥ 1,6	≥ 0,93	≥ 1,37
	$E_{57d,max}$	< 1,19	< 1,45	< 1,44	< 1,88	< 1,41	< 1,65
Thal- lium	$E_{57d,min}$	≥ 0	≥ 0	≥ 0,20	≥ 0	≥ 0	≥ 0,43
	$E_{57d,max}$	< 0,96	< 0,96	< 1,00	< 0,96	< 0,96	< 1,03
Vana- dium	$E_{57d,min}$	3,61	≥ 2,85	5,13	≥ 5,29	≥ 4,77	4,22
	$E_{57d,max}$		< 2,93		< 5,37	< 4,83	
Zink	$E_{57d,min}$	≥ 0,47	≥ 0,37	≥ 0,07	≥ 0,25	≥ 0,36	≥ 1,06
	$E_{57d,max}$	< 0,73	< 0,65	< 0,51	< 0,60	< 0,63	< 1,12

Für Stoffe, die in einem Teil der Eluate nachgewiesen wurden, ist neben der maximalen Freisetzung  $E_{57d,max}$ , auch die minimale Freisetzung  $E_{57d,min}$  angegeben, bei der die nicht nachweisbaren Konzentrationen zu Null gesetzt werden

–: nicht bestimmt

Tabelle A19: Eluatkonzentrationen des DAfStb-Langzeitstandtests an M 10

Parameter	Einheit	Eluate												
		1 (1 d)		2 (3 d)		3 (7 d)		4 (16 d)		5 (32 d)		6 (56 d)		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	11,99	11,98	11,86	12,01	11,98	11,94	11,82	11,76	11,30	11,48	11,28	11,43	
Redox-potential	mV	214	216	258	256	253	250	261	269	252	260	308	296	
Leitfähigkeit	µS/cm	2006	2037	1797	1672	1598	1439	1283	1104	860	971	546	740	
Natrium	mg/l	5,8	5,8	2,5	3,2	3,3	3,1	3,9	4,0	4,1	4,1	3,8	3,8	
Kalium		35,4	36,4	15,9	19,4	20,5	20,0	24,6	25,3	25,6	25,5	23,9	23,6	
Chlorid		0,5	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2
Sulfat		1,0	1,0	1,1	1,3	1,5	1,3	2,4	2,3	2,7	2,4	5,0	3,3	
Fluorid		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyanid	µg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Arsen		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barium		194	200	110	142	138	124	122	112	91,2	99,9	60,7	67,5	
Blei		8,9	10,9	0,96	2,03	< 0,5	0,58	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,63	0,83	
Cadmium		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chrom		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,58	0,53	0,83	0,73	0,84	0,98	0,56	< 0,5	
Kobalt		0,66	0,69	0,56	0,60	0,60	0,59	0,84	0,84	1,01	1,32	< 0,5	0,68	
Kupfer		< 0,5	< 0,5	0,60	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,56	< 0,5	0,93	1,07	0,52	< 0,5	
Molybdän		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Nickel		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Quecksilber		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Selen		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,68	0,60	< 0,5	1,12	0,93	0,63	< 0,5	
Thallium		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Vanadium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,10	1,30	1,98	2,40	2,18	1,61	
Zink		< 1,0	< 1,0	1,22	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

-: nicht bestimmt

Tabelle A20: Eluatkonzentrationen des DAfStb-Langzeitstandtests an M 11

Parameter	Einheit	Eluate												
		1 (1 d)		2 (3 d)		3 (7 d)		4 (16 d)		5 (32 d)		6 (56 d)		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	11,46	11,42	11,63	11,60	11,68	11,69	11,62	11,65	10,98	11,02	10,68	10,77	
Redox-potential	mV	237	234	267	270	272	267	280	281	290	288	355	353	
Leitfähigkeit	µS/cm	1189	1235	870	773	723	863	842	768	402	382	166	193	
Natrium	mg/l	7,9	8,0	4,3	3,9	4,3	4,5	5,7	5,7	5,6	5,5	5,2	5,1	
Kalium		30,6	31,0	16,3	14,9	16,7	17,2	20,6	20,5	19,1	18,8	16,7	16,4	
Chlorid		0,2	0,4	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1	
Sulfat		1,3	1,3	1,7	1,7	2,0	2,1	2,9	3,1	3,4	4,7	5,7	7,4	
Fluorid		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyanid	µg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,1	1,2	1,4	
Arsen		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barium		115,1	108,1	91,8	82,0	85,1	76,0	64,5	66,7	39,4	39,0	11,1	16,2	
Blei		12,7	14,0	3,69	4,09	0,94	2,53	0,97	1,05	0,52	0,54	1,82	2,29	
Cadmium		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chrom		< 0,5	0,51	< 0,5	0,54	0,57	0,76	0,95	1,01	1,19	1,34	1,11	1,64	
Kobalt		0,51	0,51	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,60	0,63	0,62	0,70	0,72	< 0,5	0,50	
Kupfer		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,59	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,57	0,67	< 0,5	0,56	
Molybdän		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Nickel		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Quecksilber		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Selen		0,63	0,72	0,56	0,67	0,75	0,94	0,87	0,84	1,87	2,10	< 0,5	< 0,5	
Thallium		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Vanadium		< 0,5	< 0,5	0,77	0,78	1,37	2,78	4,76	5,10	9,80	13,57	17,45	17,98	
Zink		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,70	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

-: nicht bestimmt

Tabelle A21: Eluatkonzentrationen des DAfStb-Langzeitstandtests an M 30

Parameter	Einheit	Eluate												
		1 (1 d)		2 (3 d)		3 (7 d)		4 (16 d)		5 (32 d)		6 (56 d)		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	-	11,60	11,77	11,49	11,48	11,52	11,51	11,24	11,37	10,58	10,79	10,51	10,55	
Redox-potential	mV	218	226	289	282	240	252	263	265	268	268	334	336	
Leitfähigkeit	µS/cm	795	875	589	577	592	590	374	470	211	258	124	140	
Natrium	mg/l	3,5	3,7	1,6	1,5	1,6	1,6	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	
Kalium		18,6	20,2	8,5	8,6	9,2	9,3	10,2	10,2	9,6	9,5	9,0	8,8	
Chlorid		0,6	0,8	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	
Sulfat		1,6	1,4	2,4	2,3	2,6	2,7	3,3	3,1	6,1	4,4	5,6	4,8	
Fluorid		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cyanid	µg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Arsen		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barium		67,6	70,8	50,9	51,4	45,2	46,8	30,3	39,6	15,0	21,3	6,5	9,4	
Blei		24,2	26,7	3,8	7,1	2,7	2,7	0,8	4,3	1,0	1,1	2,5	2,4	
Cadmium		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Chrom		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,70	0,59	0,74	0,79	0,78	0,72	
Kobalt		0,66	0,68	0,53	0,53	0,51	0,52	0,58	< 0,5	< 0,5	0,53	< 0,5	< 0,5	
Kupfer		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,54	0,51	0,59	0,57	< 0,5	< 0,5	
Molybdän		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Nickel		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Quecksilber		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Selen		0,66	0,79	1,22	0,91	1,33	1,16	1,58	1,42	1,89	1,65	< 0,5	< 0,5	
Thallium		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	
Vanadium		0,54	0,50	1,43	1,37	2,30	2,21	3,40	3,17	6,07	4,51	7,27	6,47	
Zink		2,24	2,60	1,94	2,11	1,78	1,71	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	

Spurenelement-Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

-: nicht bestimmt

**Tabelle A22:** Kumulative Freisetzungen  $E_{56d}$  des DAfStb-Langzeitstandtests (Mittelwert der Doppelbestimmungen)

Parameter		M 10 (CEM I)	M 30 (CEM III/A)	M 11 (mit FA1)
		mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>	mg/m <sup>2</sup>
1		2	3	4
Natrium		1.896	968	2.628
Kalium		11.844	5.268	9.552
Chlorid		113	192	98
Sulfat		998	1.595	1.473
Fluorid		–	–	–
Cyanid		–	–	–
Antimon	$E_{56d,min}$	$\geq 0$	$\geq 0$	$\geq 0,15$
	$E_{56d,max}$	$< 0,48$	$< 0,48$	$< 0,51$
Arsen		–	–	–
Barium		58,45	18,20	31,79
Blei	$E_{56d,min}$	$\geq 0,99$	3,17	1,81
	$E_{56d,max}$	$< 1,09$		
Cadmium		$< 0,48$	$< 0,48$	$< 0,48$
Chrom	$E_{56d,min}$	$\geq 0,20$	$\geq 0,17$	$\geq 0,38$
	$E_{56d,max}$	$< 0,30$	$< 0,29$	$< 0,42$
Kobalt	$E_{56d,min}$	$\geq 0,34$	$\geq 0,18$	$\geq 0,19$
	$E_{56d,max}$	$< 0,36$	$< 0,26$	$< 0,27$
Kupfer	$E_{56d,min}$	$\geq 0,15$	$\geq 0,09$	$\geq 0,1$
	$E_{56d,max}$	$< 0,29$	$< 0,25$	$< 0,26$
Molybdän		$< 0,48$	$< 0,48$	$< 0,48$
Nickel		$< 0,48$	$< 0,48$	$< 0,48$
Quecksilber		–	–	–
Selen	$E_{56d,min}$	$\geq 0,16$	$\geq 0,46$	$\geq 0,36$
	$E_{56d,max}$	$< 0,30$	$< 0,51$	$< 0,43$
Thallium		$< 0,48$	$< 0,48$	$< 0,48$
Vanadium	$E_{56d,min}$	$\geq 0,42$	1,57	$\geq 2,97$
	$E_{56d,max}$	$< 0,54$		$< 3,01$
Zink	$E_{56d,min}$	$\geq 0,05$	$\geq 0,50$	$\geq 0,07$
	$E_{56d,max}$	$< 0,49$	$< 0,74$	$< 0,51$

Für Stoffe, die in einem Teil der Eluate nachgewiesen wurden, ist neben der maximalen Freisetzung  $E_{56d,max}$ , auch die minimale Freisetzung  $E_{56d,min}$  angegeben, bei der die nicht nachweisbaren Konzentrationen zu Null gesetzt werden

–: nicht bestimmt

Tabelle A23: Eluatkonzentrationen des dynamischen Versuchs an M 10 (bis 24 h)

Parameter	Einheit	Blindwert		Eluate											
				1 (3 h)		2 (4 h)		3 (6 h)		4 (9 h)		5 (14 h)		6 (24 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
pH-Wert	-	7,39	7,45	7,93	7,65	7,95	7,50	7,93	7,60	7,84	8,33	9,12	9,02	9,27	9,52
Redox-potential	mV	461	490	445	510	445	488	443	476	435	446	374	407	377	382
Leitfähigkeit	µS/cm	280	272	280	291	293	301	318	349	360	383	353	329	290	255
Natrium	mg/l	16,2	15,4	16,2	15,5	16,7	16,3	17,6	17,5	18,8	18,6	18,1	17,8	17,5	16,8
Kalium		1,8	2,0	1,9	2,1	3,4	4,1	6,1	10,0	12,6	21,5	24,5	28,2	21,2	19,0
Chlorid		21,9	22,4	22,7	23,0	23,2	24,7	24,3	24,7	25,7	26,4	24,7	25,3	24,1	24,0
Sulfat		26,1	29,0	24,3	27,8	31,9	41,0	44,0	54,3	64,2	71,0	48,9	56,2	37,4	35,1
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Barium		8,50	11,3	8,56	11,0	10,5	14,1	13,9	19,7	19,7	21,4	13,7	13,8	8,10	6,20
Blei		0,58	0,74	0,54	0,65	< 0,5	0,61	< 0,5	0,61	< 0,5	0,50	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,66
Chrom		< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,54	1,57	2,71	3,09	5,57	5,43	8,51	4,19	6,74	2,41	2,91
Kobalt		0,59	0,81	0,58	0,95	0,55	0,98	0,52	1,00	0,54	1,03	0,58	0,93	0,50	0,73
Kupfer		2,22	1,96	1,84	1,79	1,77	1,75	1,81	2,16	2,47	2,38	2,63	2,66	2,06	2,17
Molybdän		< 0,5	< 0,5	0,53	0,51	0,81	0,90	1,10	1,84	1,76	3,05	1,93	2,66	1,28	1,84
Nickel		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Selen		1,85	2,06	1,61	2,27	1,67	2,33	2,03	2,64	2,07	3,10	2,17	3,13	1,54	3,12
Thallium		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Vanadium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,77	1,02	1,08	1,30
Zink		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0

nicht bestimmt: Cyanid, Fluorid, Arsen, Bor, Cadmium, Quecksilber

Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A24: Eluatkonzentrationen des dynamischen Versuchs an M 10 (&gt; 24 h bis 100 h)

Parameter	Einheit	Eluate											
		7 (36 h)		8 (48 h)		9 (60 h)		10 (72 h)		11 (84 h)		12 (100 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	9,09	9,00	8,92	8,74	8,92	8,67	8,75	8,60	8,76	8,54	8,58	8,49
Redox-potential	mV	399	428	390	444	<b>234</b>	449	438	457	440	455	453	456
Leitfähigkeit	µS/cm	279	257	308	262	260	275	276	274	288	280	289	281
Natrium	mg/l	16,2	16,1	16,0	16,0	15,8	15,8	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6
Kalium		10,7	8,2	6,0	4,5	4,3	3,4	3,4	2,8	3,0	2,5	2,7	2,4
Chlorid		22,1	22,4	22,7	22,6	22,9	22,6	23,1	22,9	23,1	22,7	23,1	23,1
Sulfat		30,0	27,0	25,0	24,9	24,3	24,2	24,2	24,6	24,4	24,1	24,4	24,6
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Barium		6,57	5,70	6,60	6,06	7,88	5,97	6,49	6,01	6,35	6,15	6,66	6,02
Blei		0,53	0,64	0,60	0,66	0,69	0,76	0,57	0,71	0,62	0,72	0,53	0,61
Chrom		1,23	0,87	0,61	0,51	0,55	< 0,5	0,50	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,80	< 0,5
Kobalt		0,73	0,73	0,75	0,76	0,77	0,76	0,77	0,77	0,78	0,80	0,80	0,79
Kupfer		2,27	1,49	1,70	1,41	2,78	1,25	1,62	1,19	1,58	1,47	1,87	1,38
Molybdän		0,96	0,88	0,68	0,70	0,63	0,62	0,57	0,60	0,57	0,57	0,68	0,55
Nickel		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,9	< 1,0
Selen		1,67	2,60	1,50	2,42	1,79	2,07	1,66	2,24	1,57	1,97	1,56	2,09
Thallium		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Vanadium		1,03	0,50	0,51	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Zink		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0

nicht bestimmt: Cyanid, Fluorid, Arsen, Bor, Cadmium, Quecksilber

**fettgedruckt:** vermutlich Ausreißer

Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A25: Eluatkonzentrationen des dynamischen Versuchs an M 11 (bis 24 h)

Parameter	Einheit	Blindwert		Eluate											
				1 (3 h)		2 (4 h)		3 (6 h)		4 (9 h)		5 (14 h)		6 (24 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
pH-Wert	-	7,78	7,73	7,98	7,84	8,00	7,83	7,92	7,56	7,97	7,85	9,09	9,22	9,29	9,51
Redox-potential	mV	410	414	451	420	443	428	457	391	440	392	381	378	379	366
Leitfähigkeit	µS/cm	277	275	274	269	278	282	304	304	353	364	349	348	287	297
Natrium	mg/l	15,3	15,7	15,4	15,8	15,6	16,5	17,1	18,4	19,9	21,4	19,7	20,6	17,3	18,2
Kalium		1,8	2,1	1,8	2,1	2,0	2,4	3,3	4,7	8,8	12,5	17,0	21,7	15,9	18,5
Chlorid		19,3	18,9	20,5	18,9	20,0	19,1	20,7	20,1	22,1	21,3	21,5	20,9	20,8	19,6
Sulfat		21,7	24,0	22,6	25,7	25,9	30,2	37,0	42,9	56,5	59,3	49,4	48,3	21,7	30,5
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Barium		8,96	12,4	8,81	<b>21,8</b>	9,47	17,9	11,6	16,8	16,6	21,8	15,6	17,0	8,70	10,4
Blei		0,83	0,95	0,82	< 0,5	0,75	< 0,5	0,72	3,65	0,66	0,56	0,53	0,53	0,65	0,60
Chrom		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,95	1,21	2,98	3,28	6,99	6,74	6,55	5,82	2,95	2,52
Kobalt		0,82	0,98	0,76	1,34	0,81	1,33	0,83	1,07	0,85	1,06	0,81	0,97	0,71	0,81
Kupfer		2,25	2,57	2,31	2,29	1,87	3,06	2,18	2,06	2,10	2,31	2,65	2,59	2,84	3,93
Molybdän		0,58	0,57	0,63	< 0,5	1,46	1,25	5,08	5,42	15,3	15,7	15,9	15,4	6,72	6,20
Nickel		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Selen		2,26	1,15	2,47	1,81	2,45	1,38	2,51	1,45	3,75	1,57	3,28	2,85	2,14	1,88
Thallium		1,34	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Vanadium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,77	< 0,5	0,70	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,53	0,67	1,98	1,46	2,49
Zink		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0

nicht bestimmt: Cyanid, Fluorid, Arsen, Bor, Cadmium, Quecksilber

**fettgedruckt:** vermutlich Ausreißer, Wert wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt

Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A26: Eluatkonzentrationen des dynamischen Versuchs an M 11 (&gt; 24 h bis 100 h)

Parameter	Einheit	Eluate											
		7 (36 h)		8 (48 h)		9 (60 h)		10 (72 h)		11 (84 h)		12 (100 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	9,11	9,15	9,02	9,01	8,80	8,93	8,76	8,77	8,79	8,59	8,66	8,60
Redox-potential	mV	405	383	409	395	436	426	415	429	420	411	427	417
Leitfähigkeit	µS/cm	262	330	267	270	272	283	276	<b>445</b>	271	322	271	279
Natrium	mg/l	16,1	16,7	15,7	16,3	15,4	16,2	15,4	16,1	15,2	16,1	15,1	16,1
Kalium		7,7	8,9	4,2	4,8	3,0	3,4	2,6	2,7	2,3	2,4	2,1	2,3
Chlorid		20,1	18,9	19,7	18,8	19,8	19,1	19,6	18,8	19,2	18,9	19,3	18,9
Sulfat		23,3	22,8	21,8	21,6	22,1	21,2	22,0	21,3	21,4	21,3	21,9	21,4
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Barium		6,81	7,66	6,41	6,98	6,34	6,61	6,68	6,45	6,07	6,34	6,53	6,84
Blei		0,80	0,54	0,75	0,69	0,74	0,71	<b>13,6</b>	0,53	<b>3,02</b>	0,50	<b>1,56</b>	0,50
Chrom		1,00	0,84	0,51	0,50	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kobalt		0,70	0,75	0,68	0,75	0,72	0,74	0,81	0,74	0,73	0,76	0,73	0,72
Kupfer		2,12	1,97	1,87	2,09	1,86	2,63	1,67	2,28	1,73	2,93	2,01	2,18
Molybdän		1,76	1,81	0,76	0,88	0,57	0,67	0,50	0,62	0,52	0,60	< 0,5	0,54
Nickel		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Selen		2,39	1,28	2,10	1,96	2,30	1,53	2,44	1,04	1,91	1,40	1,83	1,22
Thallium		1,01	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Vanadium		0,98	2,03	< 0,5	1,45	< 0,5	1,20	< 0,5	1,05	< 0,5	1,03	< 0,5	0,98
Zink		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	<b>2630</b>

nicht bestimmt: Cyanid, Fluorid, Arsen, Bor, Cadmium, Quecksilber

**fettgedruckt:** vermutlich Ausreißer

Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A27: Eluatkonzentrationen des dynamischen Versuchs an M 30 (bis 24 h)

Parameter	Einheit	Blindwert		Eluate											
				1 (3 h)		2 (4 h)		3 (6 h)		4 (9 h)		5 (14 h)		6 (24 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
pH-Wert	-	7,52	7,56	7,87	7,74	7,90	7,89	7,96	7,84	8,41	8,08	9,11	9,16	9,21	9,34
Redox-potential	mV	477	413	447	400	453	410	426	411	416	393	374	362	372	363
Leitfähigkeit	$\mu\text{S}/\text{cm}$	247	254	249	276	271	310	305	318	333	348	303	328	244	256
Natrium	mg/l	13,5	13,8	13,7	13,8	14,3	14,4	14,9	15,2	15,4	15,9	14,8	15,2	14,1	14,7
Kalium		1,5	2,8	1,6	2,8	2,9	4,5	7,6	9,2	15,4	16,8	19,3	20,3	14,3	14,8
Chlorid		18,5	17,7	18,5	18,2	21,7	21,1	24,8	25,1	27,9	28,0	24,9	25,0	20,7	20,6
Sulfat		22,6	34,4	22,6	27,9	32,2	37,1	42,4	48,7	52,4	58,6	44,6	50,7	30,1	33,9
Antimon	$\mu\text{g}/\text{l}$	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Barium		7,77	16,9	8,00	15,5	10,6	20,3	15,4	26,6	18,2	28,8	13,3	21,2	7,6	11,7
Blei		0,65	< 0,5	0,54	< 0,5	0,60	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,55	< 0,5
Chrom		< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,50	0,54	0,92	1,16	1,46	1,93	2,50	1,89	2,46	0,96	1,45
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kupfer		2,32	2,75	1,79	2,67	4,92	2,80	1,73	2,73	2,26	3,46	2,67	3,97	2,08	3,26
Molybdän		0,78	< 0,5	0,66	< 0,5	1,01	0,69	1,58	1,22	2,11	2,08	1,77	2,02	1,11	1,27
Nickel		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Selen		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Thallium		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Vanadium		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,06	< 0,5	2,13	0,66	2,40	1,38
Zink		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0

nicht bestimmt: Cyanid, Fluorid, Arsen, Bor, Cadmium, Quecksilber

Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1  $\mu\text{g}/\text{l}$ ) und Nachweisgrenze (0,5  $\mu\text{g}/\text{l}$ ) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

Tabelle A28: Eluatkonzentrationen des dynamischen Versuchs an M 30 (&gt; 24 h bis 100 h)

Parameter	Einheit	Eluate											
		7 (36 h)		8 (48 h)		9 (60 h)		10 (72 h)		11 (84 h)		12 (100 h)	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	-	9,04	8,98	8,88	8,84	8,80	8,82	8,68	8,78	8,65	8,67	8,50	8,68
Redox-potential	mV	403	353	394	402	408	416	427	424	438	443	435	444
Leitfähigkeit	µS/cm	234	231	244	230	248	237	272	240	242	242	243	248
Natrium	mg/l	13,7	14,4	13,5	14,3	13,4	14,4	13,4	14,2	13,3	14,4	13,3	14,4
Kalium		7,4	7,7	4,4	4,6	3,3	3,3	2,6	2,7	2,3	2,4	2,1	2,2
Chlorid		18,8	18,1	18,1	17,7	18,1	<b>19,9</b>	18,0	17,7	18,0	17,9	18,2	18,1
Sulfat		23,1	25,5	21,9	24,4	21,6	24,4	22,0	24,1	22,1	24,4	22,1	25,0
Antimon	µg/l	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Barium		6,11	8,43	7,65	7,17	5,83	6,60	5,71	6,36	5,49	6,22	5,25	6,34
Blei		0,66	< 0,5	0,56	< 0,5	0,52	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,69	< 0,5	0,67	< 0,5
Chrom		< 0,5	0,71	< 0,5	0,60	< 0,5	0,51	< 0,5	0,53	< 0,5	0,57	< 0,5	0,60
Kobalt		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Kupfer		1,59	2,62	1,50	2,85	1,22	1,66	1,23	2,45	<b>17,5</b>	2,17	1,15	2,08
Molybdän		0,78	0,80	<b>3,58</b>	0,68	0,58	0,51	0,61	0,51	0,54	0,52	0,58	0,52
Nickel		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Selen		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Thallium		< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Vanadium		1,95	1,12	1,45	0,72	1,21	< 0,5	1,04	< 0,5	1,00	< 0,5	0,94	< 0,5
Zink		< 1,0	< 1,0	< 1,0	<b>1160</b>	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0

nicht bestimmt: Cyanid, Fluorid, Arsen, Bor, Cadmium, Quecksilber

**fettgedruckt:** vermutlich Ausreißer, Wert wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt

Konzentrationen zwischen Bestimmungsgrenze (1 µg/l) und Nachweisgrenze (0,5 µg/l) sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet und können nur als Anhaltswerte gelten

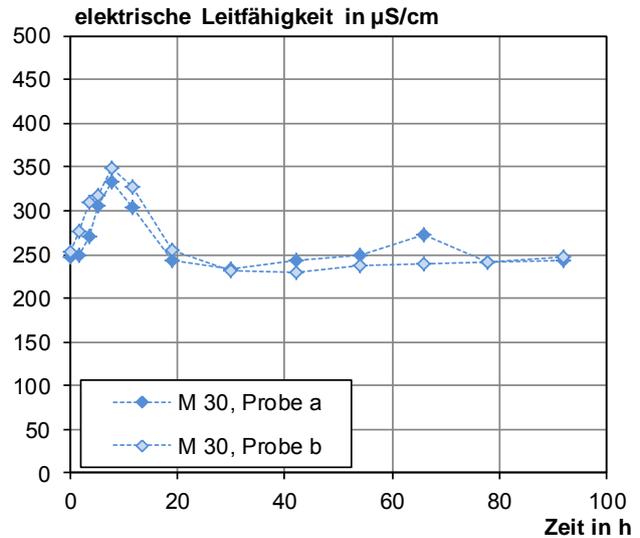
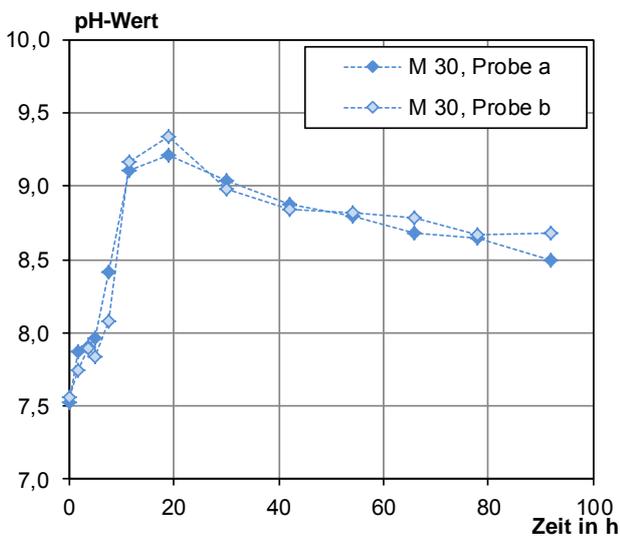
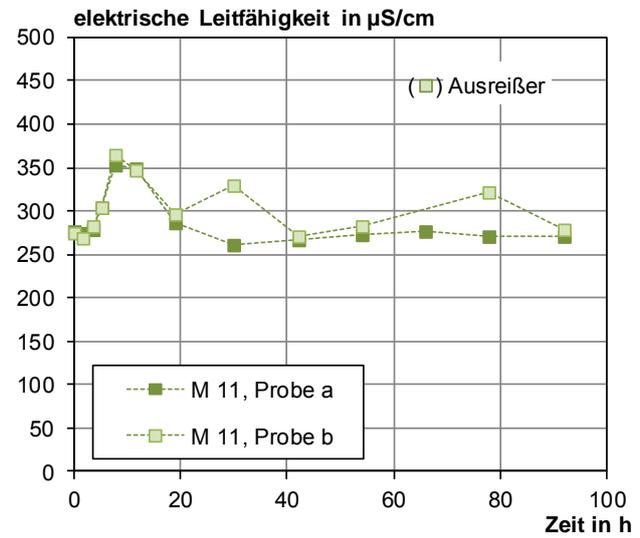
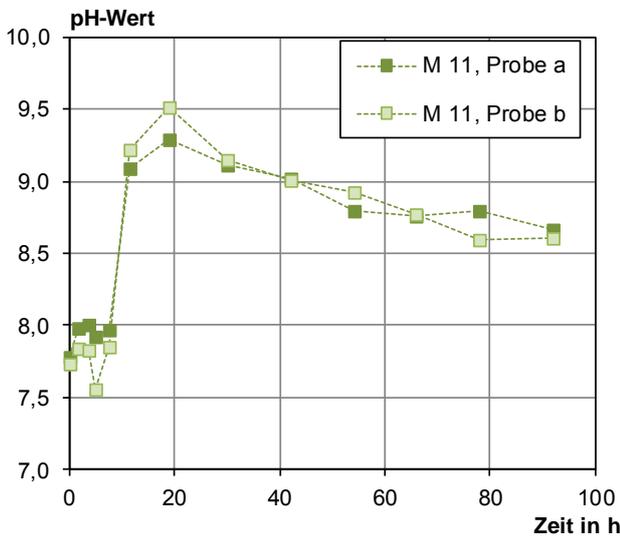
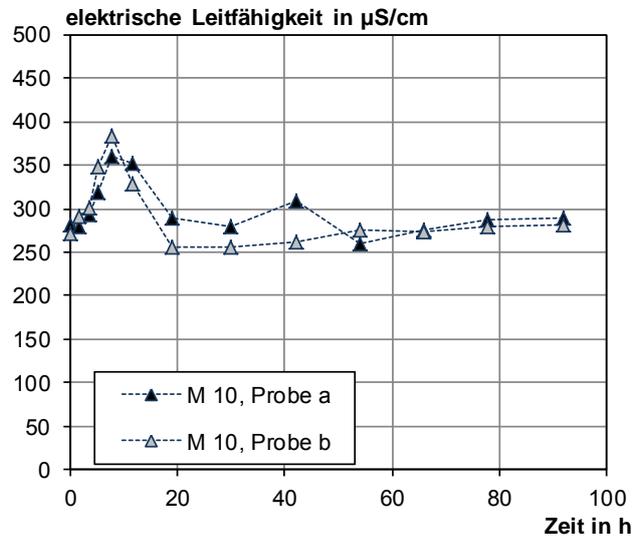
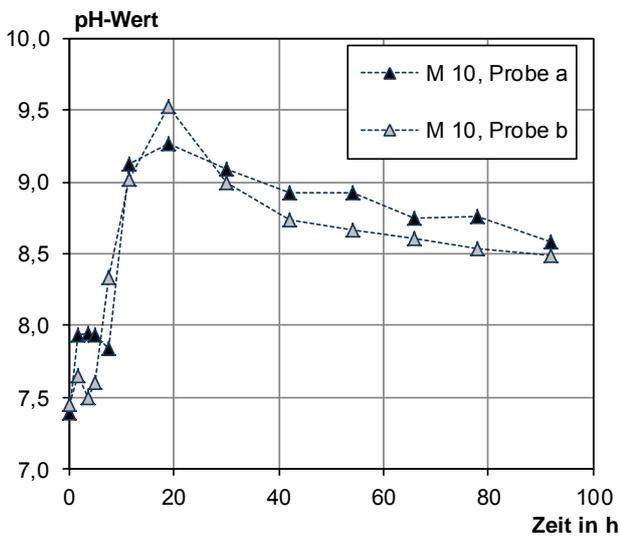
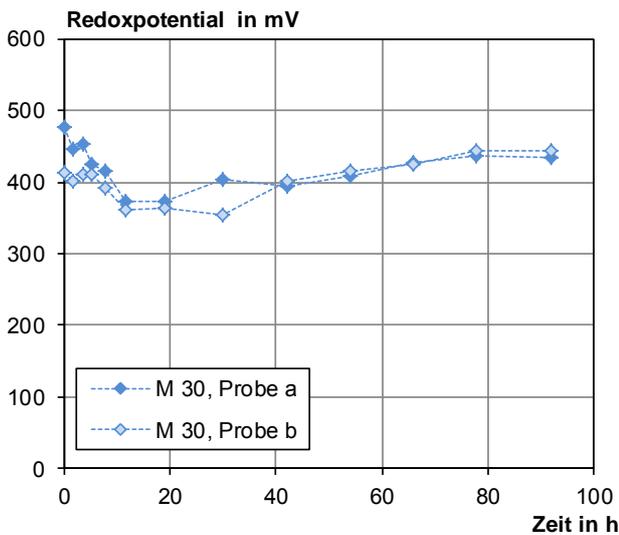
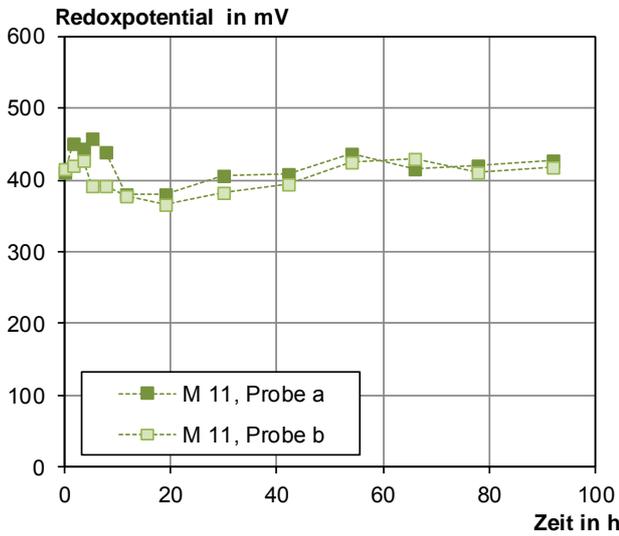
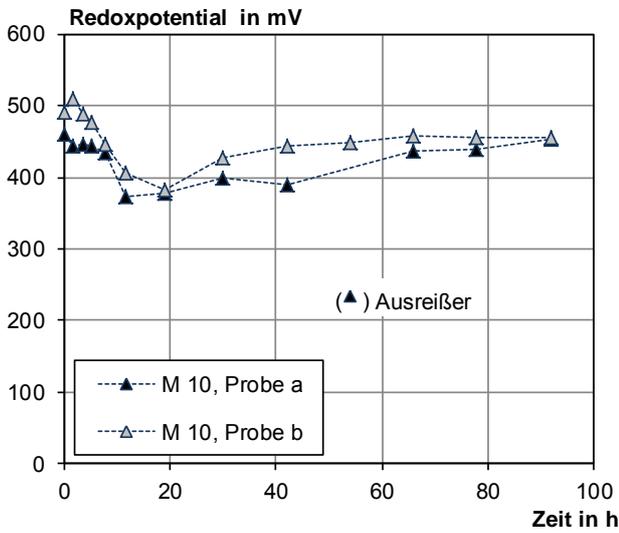
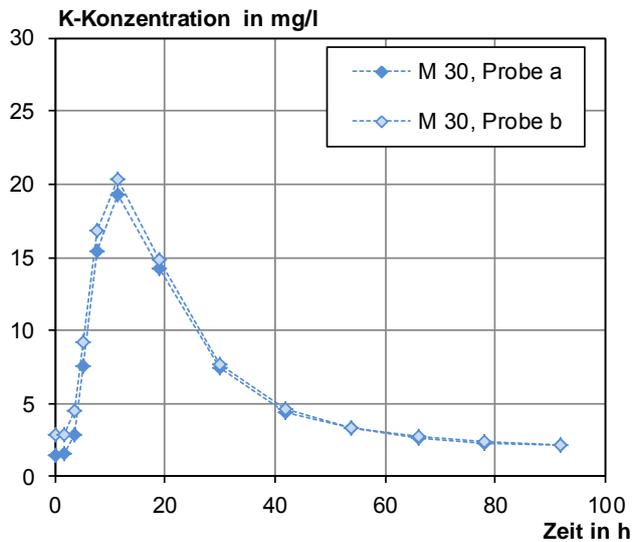
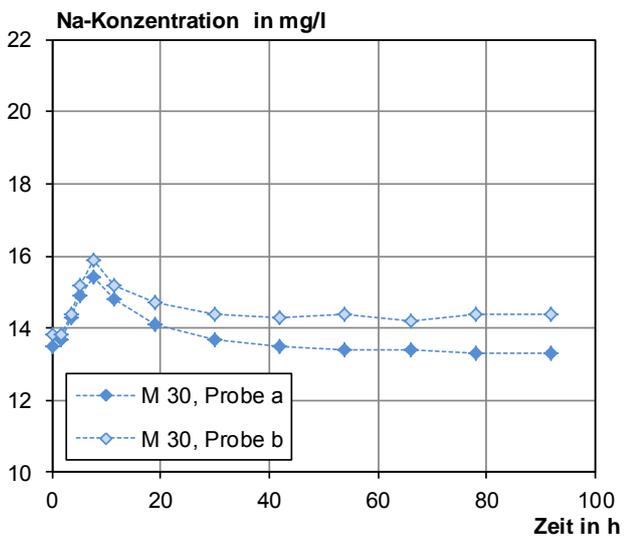
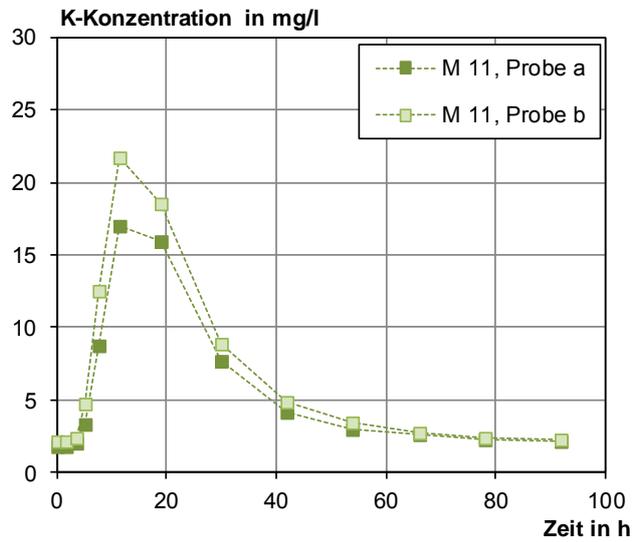
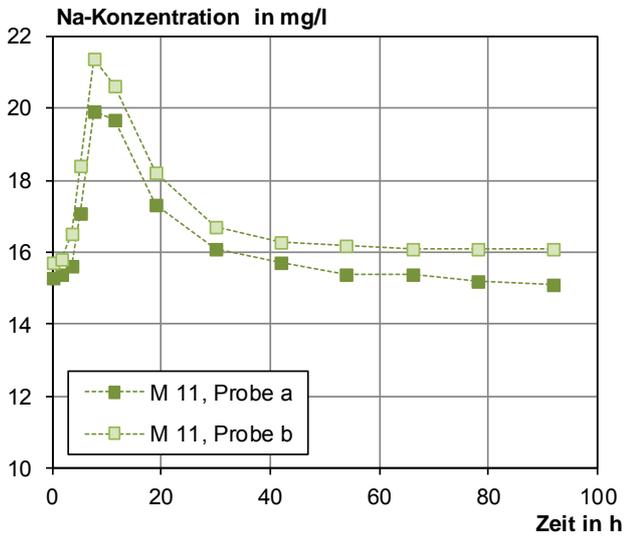
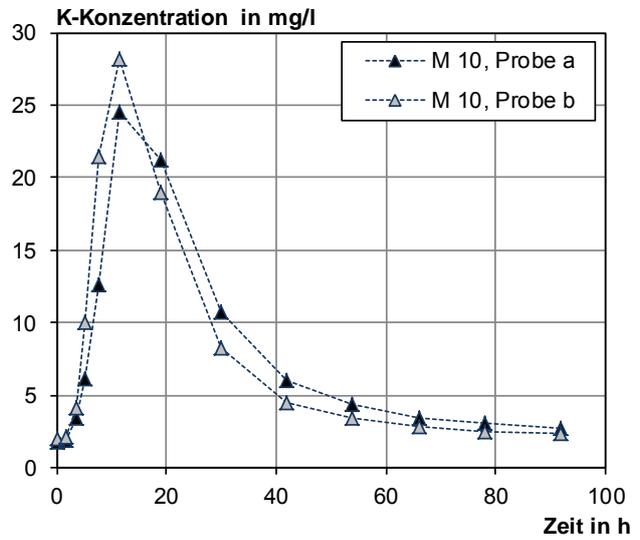
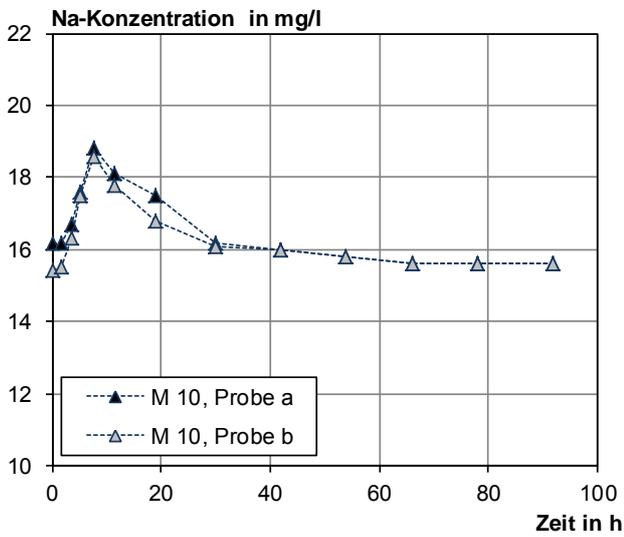


Bild B1: pH-Werte und elektrische Leitfähigkeiten im dynamischen Versuch



**Bild B2:** Redoxpotentiale im dynamischen Versuch



**Bild B3:** Natrium- und Kaliumkonzentrationen im dynamischen Versuch

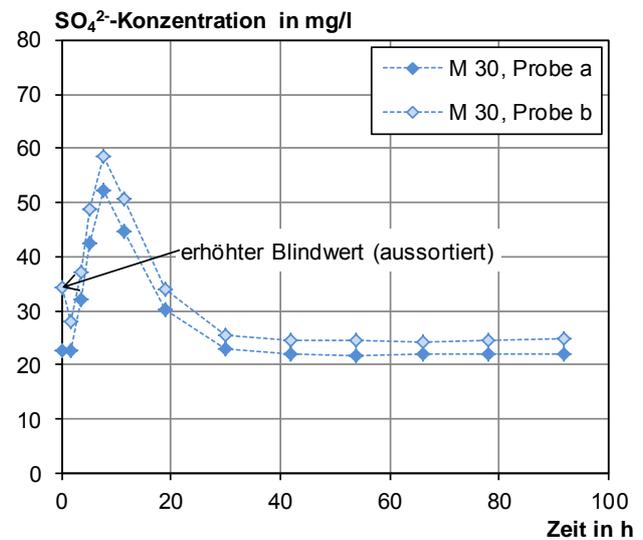
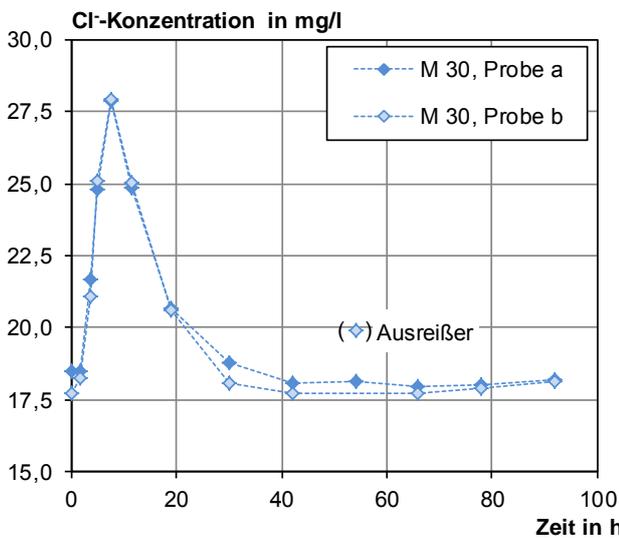
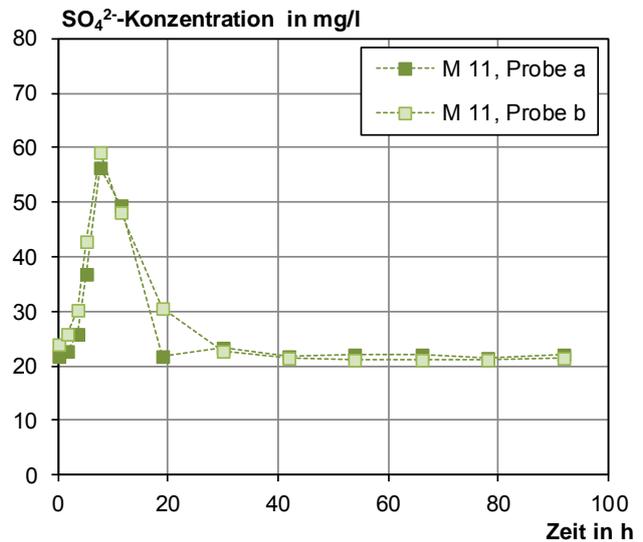
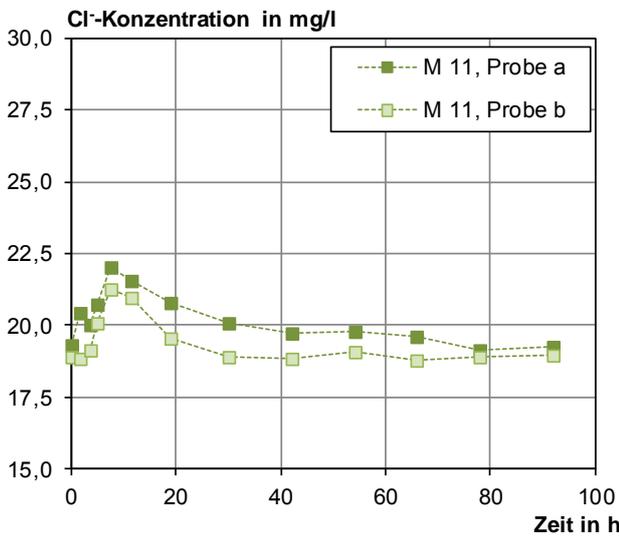
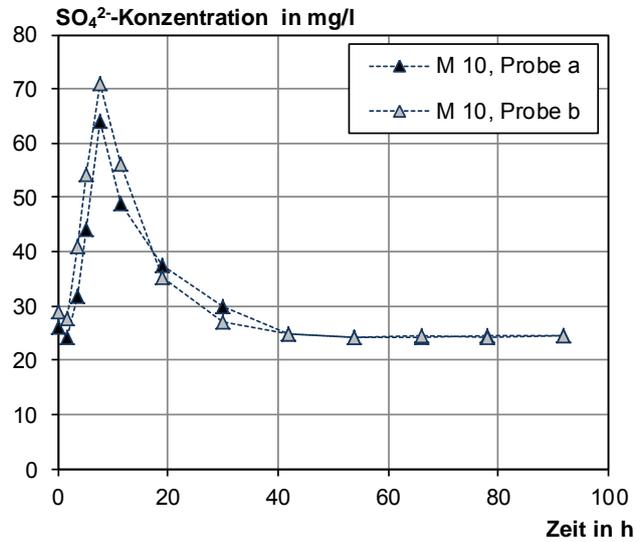
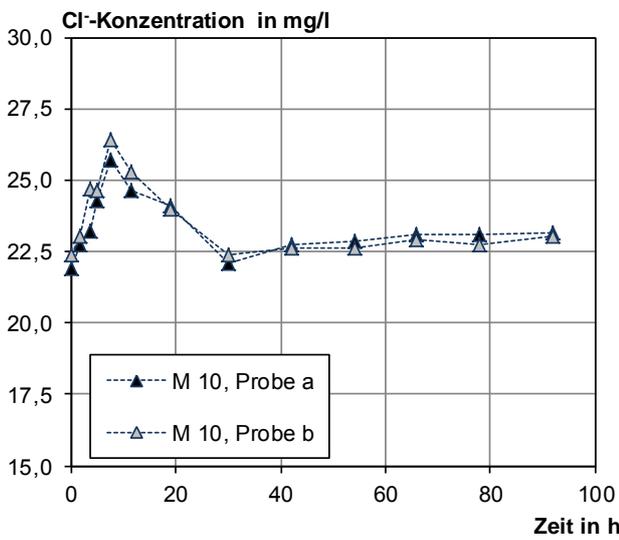
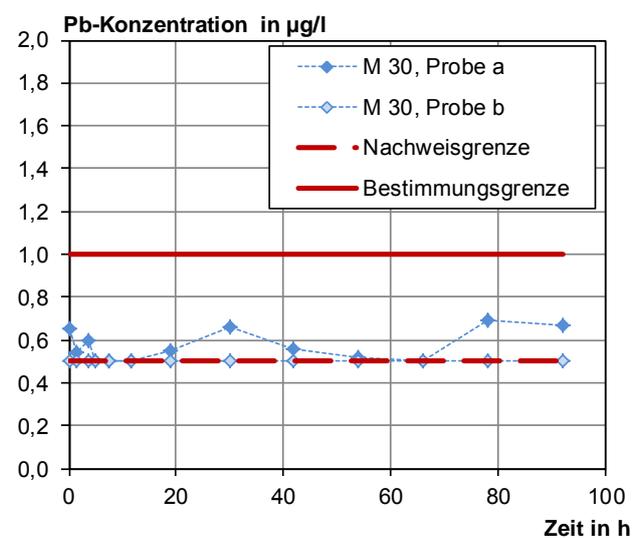
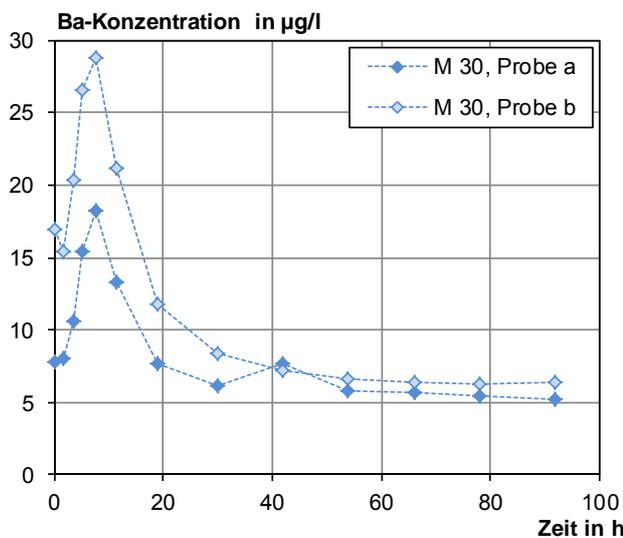
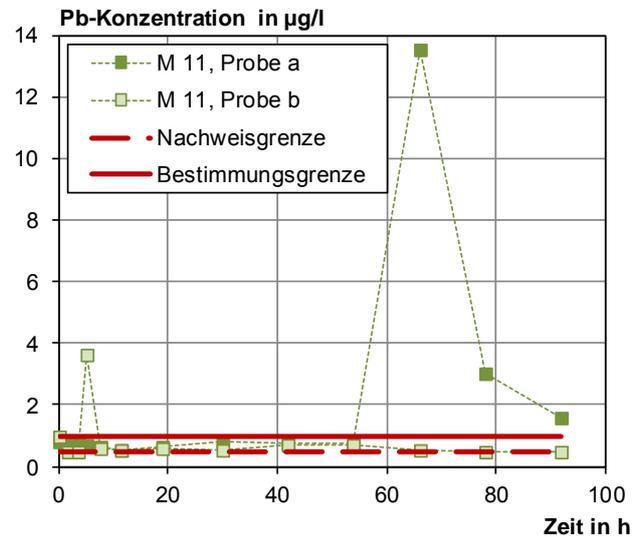
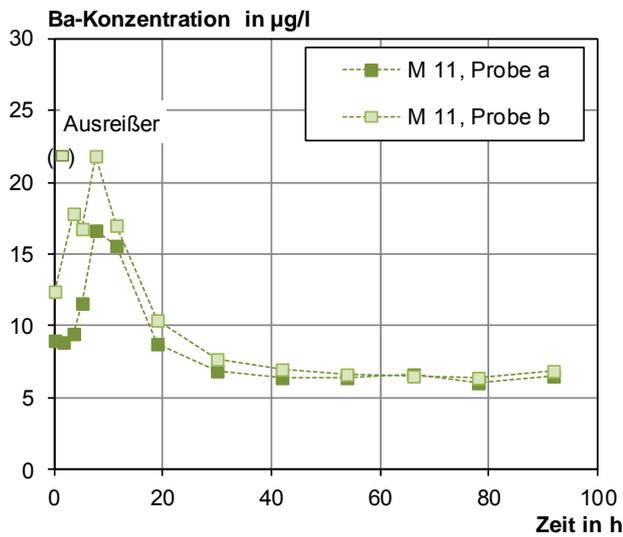
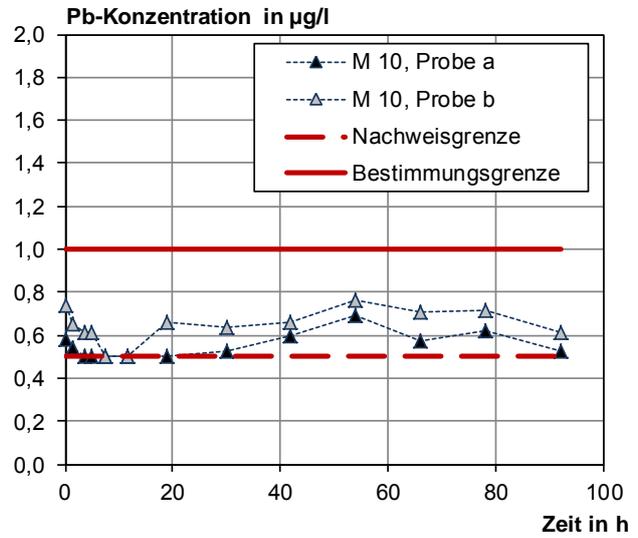
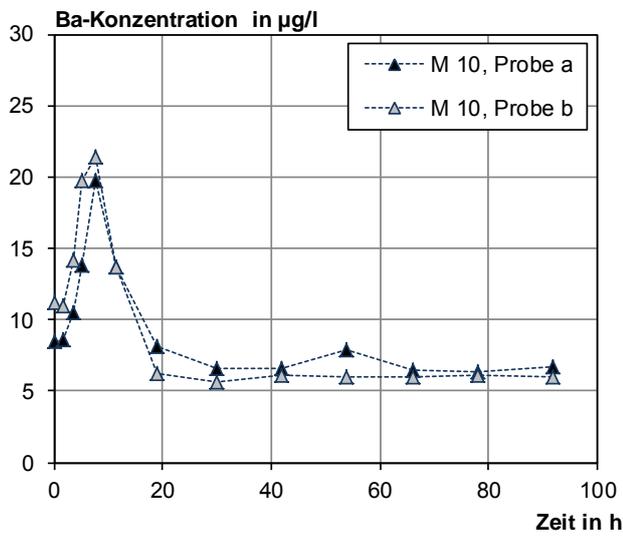


Bild B4: Chlorid- und Sulfatkonzentrationen im dynamischen Versuch



**Bild B5:** Barium- und Bleikonzentrationen im dynamischen Versuch

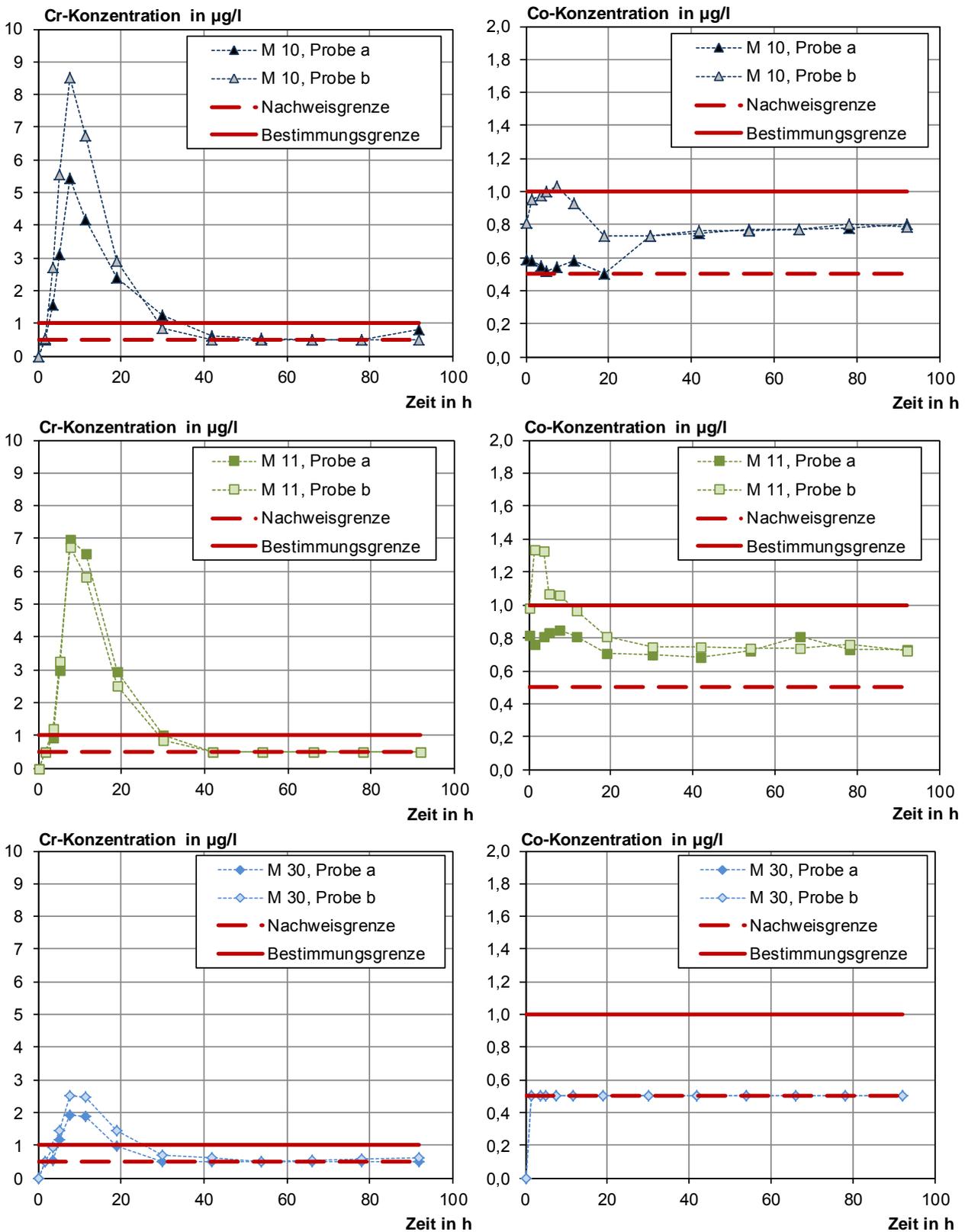


Bild B6: Chrom- und Kobaltkonzentrationen im dynamischen Versuch

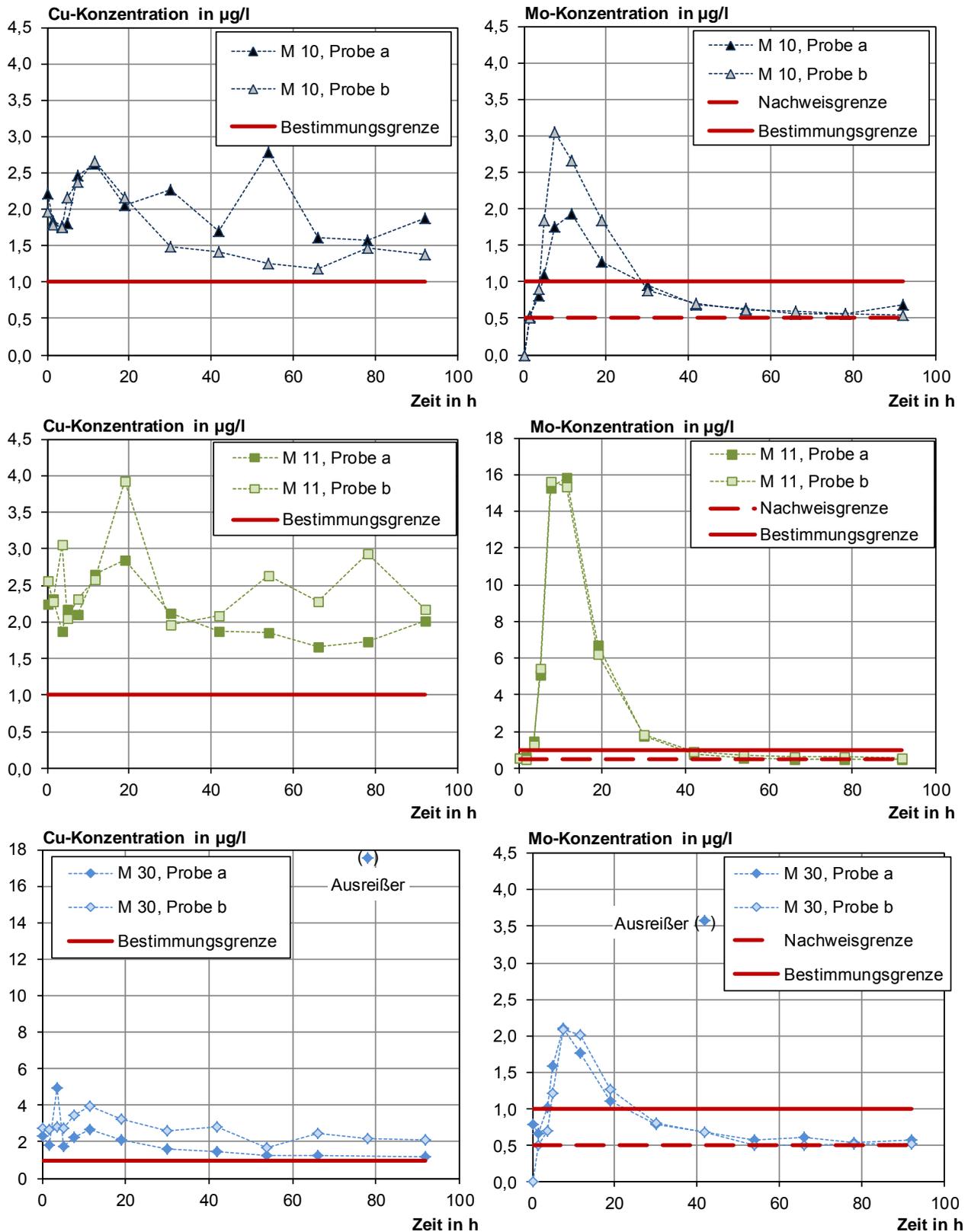


Bild B7: Kupfer- und Molybdänkonzentrationen im dynamischen Versuch

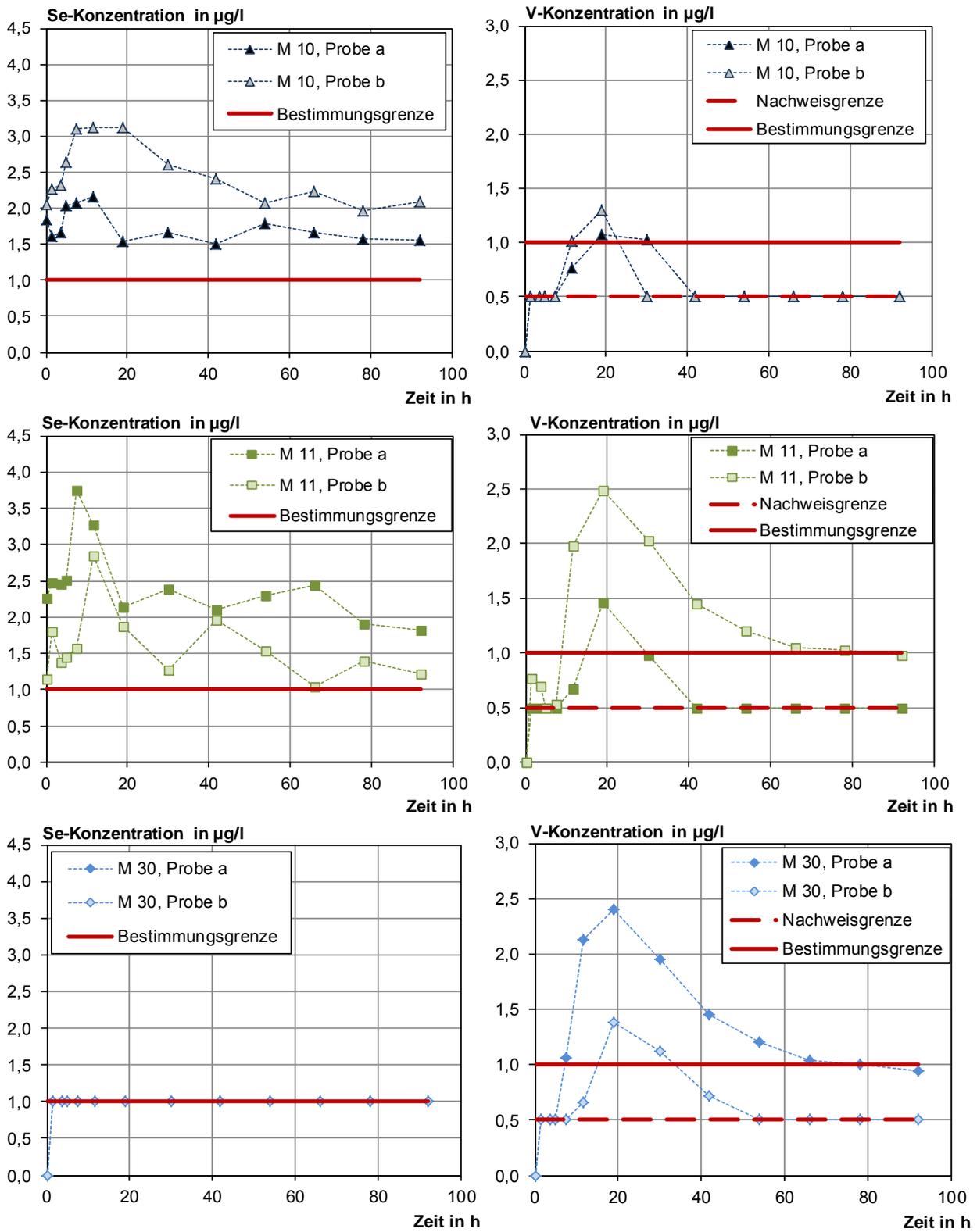


Bild B8: Selen- und Vanadiumkonzentrationen im dynamischen Versuch